PUBLICACIONES RECIENTES PIEB

El costo ecológico de la política minera en Huanuni y Bolívar
Elizabeth López (coord.), Ángela Cuenca, Silvana Lafuente, Emilio Madrid y Patricia Molina

Tecnologías limpias aplicables a la explotación de oro
Félix Carrillo (coord.), Ruth Zenteno y Laura Rubín de Celis

Remediación ambiental como alternativa de desarrollo local para la subcuenca de Japo-Pairumani
Gerardo Zamora (coord.), Antonio Salas, Octavio Hinojosa, Genny Isabel Claure, Pedro R. Vallejos, Milton Pérez y Cinda Beltrán

Daño genotóxico causado por la contaminación minera en Oruro
María E. Ascarrumz (coord.), Jacques Gardón, Flavia Barbieri, Ma. Eugenia García, Noemí Tirado, Marina Cuti, Pamela Paco, Cristina Mejía, María Ruiz, Maritza Mercado y Mauricio Ormachea

La herencia de la mina. Representaciones acerca de la contaminación minera en Potosí
Ingrid Tapia (coord.) Olivier Barras y Juan Carlos Oporto

Minería y conflictos socioambientales en Cantumarca
Rosario Tapia (coord.), Lourdes Tapia y Ernesto Quintana

Generación, distribución y uso del excedente de hidrocarburos en Bolivia (Incluye un CD con matrices)
Hugo del Granado (coord.), Leila Mokrani, Mauricio Medinaceli y Jorge Gumucio

Uso productivo del excedente hidrocarburífero Propuesta de creación del Fondo Soberano de las Regiones
Juan Carlos Guzmán (coord.), María del Carmen Crespo, Tatiana Genuzio y César Santa Gadea

Excedente y renta en la minería mediana. Determinantes del crecimiento minero 2000-2009
Rolando Jordán (coord.), Julio Humérez, Eliodoro Sandi y Paola Arano

Arquitecturas emergentes en El Alto: el fenómeno estético como integración cultural
Randolph Cárdenas (coord.), Edwin Mamani y Sandra Beatriz Sejas

La reconstitución del Jach'a Suyu y la Nación Pakajaqi. Entre el poder local y la colonialidad del derecho indígena
Guery Chuquimia (coord.), Rubén Chambi y Fernando Claros

En busca de la tierra sin mal. Los derechos indígenas en territorios guaraní
Karina Fernández (coord.) y Dante Vladimir Illanes

¿Hasta qué punto las aguas residuales del ingenio de Machacamarca que son vertidas sin previo tratamiento al río del mismo nombre contribuyen a la contaminación de las aguas y suelos de la zona y afectan la calidad de vida de las comunidades adyacentes?

Este libro expone la problemática de la contaminación minera en Oruro con el caso concreto del ingenio arriba citado, pero no se queda en la problemática de la catástrofe ambiental sino que propone un sistema de tratamiento de aguas contaminadas usando recursos sencillos, de bajo costo y con materiales ecológicos disponibles en el entorno del altiplano orureño. Plantea de ese modo un proyecto a diseño final para el tratamiento de aguas contaminadas y un invernadero para el cultivo de especies regadas con aguas tratadas.

ISBN: 978-99954-32-90-4



2010

THUSKA UMA

PIEB









THUSKA UMA

Tratamiento de aguas ácidas con fines de riego

Juan Carlos Montoya

Jorge Amusquívar
Gunnar Guzmán
David Quispe
Rosmery Blanco
Norma Mollo

El Programa de Investigación Estratégica en Bolivia (PIEB) inició sus actividades el año 1994, en el marco institucional de la Fundación PIEB. Es un programa de carácter científico, cultural y social, creado con el propósito de contribuir al desarrollo de Bolivia a través de la promoción de la investigación científica sobre temas relevantes y estratégicos.

Los objetivos del PIEB son:

1. Apoyar la investigación orientada a la reflexión y comprensión de la realidad boliviana con la finalidad de contribuir a la generación de propuestas de políticas públicas frente a problemáticas nacionales, promover la disminución de asimetrías sociales y la inequidad existentes, lograr una mayor integración social y fortalecer la democracia en Bolivia.
2. Incentivar la producción de conocimientos socialmente relevantes y las aproximaciones multidisciplinaras que permitan visiones integrales de la sociedad, promoviendo simultáneamente la excelencia académica. Para el PIEB, desarrollar el conocimiento, investigación y acceso a la información son pilares para que una sociedad pueda afrontar su futuro.
3. Promover la formación de nuevas generaciones de investigadores dando énfasis en la formación de jóvenes. "Investigar formando y formar investigando" es uno de los principales propósitos del PIEB.
4. Desarrollar la capacidad local, regional y nacional de investigación a través de iniciativas de fortalecimiento a recursos humanos e institucionales.
5. Democratizar el acceso al conocimiento, a través de medios de comunicación especializados en investigación, ciencia y tecnología, y la creación de espacios de encuentro entre el Estado, la sociedad civil y la academia.

El año 2008, el PIEB puso en marcha el Programa de Investigación Ambiental (PIEB-PIA) con el objetivo de contribuir a propiciar acciones de cambio a favor del desarrollo sostenible en el país, mediante la formulación de propuestas de investigación que orienten a la toma de decisión y a las políticas públicas a nivel local y nacional. En ese marco el Programa desarrolla sus actividades en distintas temáticas ambientales bajo una perspectiva integral, con la consideración de las dimensiones: social, económica, política y territorial.

Thuska Uma:
tratamiento de aguas ácidas con fines de riego

Thuska Uma:
tratamiento de aguas ácidas con fines de riego

Coordinador de la investigación
Juan Carlos Montoya Choque

Investigadores:
Jorge Amusquívar Fernández
Gunnar D. Guzmán Vega
David W. Quispe Tapia
Rosmery Blanco Fernández
Norma Mollo Mollo

Colaboradores:
Dante Ayaviri Nina
Fabiola T. Molina G.
Pamela Chávez A.
Marco A. Eugenio Vega
Víctor Flores
Milton Pérez Lovera
Pedro Vallejos Mamani


Embajada Real
de Dinamarca



Programa de Investigación
Estratégica en Bolivia

Oruro, 2010

Esta publicación cuenta con el auspicio de la Embajada Real de Dinamarca.

Montoya Choque, Juan Carlos
Thuska Uma: Tratamiento de aguas ácidas con fines de riego / Juan Carlos Montoya Ch.; Jorge Amusquívar Fernández; Gunar Guzmán Vega; David Quispe Tapia; Rosmery Blanco Fernández; Norma Mollo Mollo. – La Paz: Embajada Real de Dinamarca; Fundación PIEB, 2010.
xxiv; 217 p. ; maps.; cuads.; grafs.; fots: 23 cm. -- (Serie Investigación Ambiental no.7)

D.L. : 4-1-1776-10
ISBN: 978-99954-32-90-4 : Encuadernado

CONTAMINACIÓN MINERA / OPERACIONES MINERAS-INGENIOS / CONTAMINACIÓN FLUVIAL / CONTAMINACIÓN QUÍMICA / ANÁLISIS DEL AGUA / TRATAMIENTO DEL AGUA / POLÍTICA DE MEDIO AMBIENTE / CONTAMINACIÓN POR METALES / ANÁLISIS DEL SUELO / DETERIORO DEL MEDIO AMBIENTE / GESTIÓN AMBIENTAL / CONTAMINACIÓN DEL SUELO / RIESGO SANITARIO / PROTECCIÓN DEL MEDIO AMBIENTE / VIDA SILVESTRE-ESTUDIO / TIERRA RECUPERADA / ABONO ORGÁNICO / DESARROLLO SOSTENIBLE-COMUNIDADES / ALIMENTACIÓN ANIMAL-FORRAJE / SISTEMA DE CULTIVO / ORURO / MACHACAMARCA-INGENIO/

1. título **2**. serie

Edificio Fortaleza. Piso 6. Oficina 601
Avenida Arce 2799, esquina calle Cordero
Teléfonos: 2432583 - 2431866
Fax: 2435235
Correo electrónico: fundacion@pieb.org
Servicio Informativo: www.pieb.com.bo
Casilla 12668
La Paz-Bolivia

Edición: Soledad Domínguez

Diseño gráfico de cubierta: PIEB

Fotografía de portada: Jean-Louis Duprey

Diagramación: Marco Alberto Guerra M.

Impresión: Plural editores
Av. Ecuador 2337 esq. Calle Rosendo Gutiérrez
Teléfono 2411018 / Casilla 5097 / La Paz-Bolivia
e-mail: plural@plural.bo / www.plural.bo

Impreso en Bolivia
Printed in Bolivia

Índice

Índice de cuadros

Índice de gráficos

Índice de figuras

Índice de esquemas

Índice de imágenes

Índice de mapas

Presentación

En el marco del Programa de Apoyo al Desarrollo Sostenible, Gestión de Recursos Naturales y Medio Ambiente, de la Embajada Real de Dinamarca, el Programa de Investigación Estratégica en Bolivia (PIEB) implementa el componente de investigación ambiental, que tiene como uno de sus principales objetivos contribuir a promover, actualizar e incidir en políticas públicas con conocimiento, debate y propuestas sobre la temática ambiental y el desarrollo sostenible en Bolivia y fortalecer las capacidades en investigación ambiental.

El PIEB, a través de su Programa de Investigación Ambiental (PIA), impulsa el desarrollo de la investigación en las temáticas de gestión ambiental y de riesgos, gestión comunitaria de la biodiversidad y los recursos naturales.

En ese marco se inscribe la realización de las convocatorias para proyectos de investigación sobre Contaminación Minera en los departamentos de Oruro y Potosí, lanzadas en la gestión 2008 con el apoyo de una importante Plataforma Institucional integrada por las Prefecturas de los departamentos de Oruro y Potosí, la Universidad Técnica de Oruro (UTO), la Universidad Autónoma Tomás Frías (UATF), la Asociación de Municipios del Departamento de Oruro (AMDEOR), la Asociación de Municipios del Departamento de Potosí (AMDEPO), el Centro de Ecología y Pueblos Andinos (CEPA), el Instituto Francés de Investigación para el Desarrollo (IRD) y la Sociedad Potosina de Ecología (SOPE). Las convocatorias buscaron incidir en políticas públicas para la gestión ambiental minera, a través de la producción de conocimiento que desemboque en alternativas

para la prevención y mitigación de los efectos ocasionados por la contaminación minera.

Las investigaciones promovidas al interior de estas convocatorias se desarrollaron en dos fases de trabajo, entre los años 2008 y 2009: la primera, encaminada a la investigación misma; y la segunda, relacionada a la formulación de propuestas expresadas en planes, programas, proyectos, estrategias metodológicas, entre otros, con el fin de brindar respuestas concretas a las problemáticas estudiadas.

En este tiempo, se dio una interesante interacción entre investigadores, operadores de políticas públicas, actores de la sociedad civil, periodistas, en torno a los temas estudiados. Las investigaciones, sus resultados y propuestas fueron ampliamente difundidos y es grato mencionar que muchas de ellas han alimentado el diseño de políticas públicas relacionadas a la gestión ambiental minera y la salud. En esa óptica, los resultados de las investigaciones sobre contaminación minera han sido incorporados en planes de remediación ambiental y de desarrollo social; por otra parte, orientan programas de salud locales en Oruro y Potosí, y también han despertado interés en cooperativas mineras y comunidades locales, para la implementación de tecnologías de producción más limpia.

La participación social ha sido uno de los factores de mayor importancia en la realización de las investigaciones, tomando en cuenta que en la actualidad la incidencia más efectiva en políticas públicas se da mediante la movilización de los actores involucrados en una problemática. Es así que los beneficiarios de las investigaciones: comunidades locales, cooperativas mineras, población civil expuesta a los riesgos de la contaminación, operadores de políticas públicas, entre otros, cuentan con información, resultado de procesos de investigación, y con propuestas de remediación ambiental y desarrollo local, para la generación de demandas que mejoren la calidad ambiental y la calidad de vida. Este proceso de posicionamiento y reconocimiento público de los problemas ocasionados por la contaminación, es un antecedente importante para futuras iniciativas.

Destacamos, en ese sentido, la publicación de la primera serie de investigaciones ambientales y propuestas de intervención, integrada

por siete títulos relacionados a cuatro ejes temáticos: Políticas públicas para la gestión ambiental; Conflictos socio-ambientales en la gestión de los recursos hídricos y suelos; Políticas en salud y exposición a los riesgos de contaminación; y Tecnologías limpias aplicables a la pequeña minería.

Estos trabajos han sido desarrollados por un conjunto de destacados investigadores de diferentes disciplinas, comprometidos con el desarrollo del país a través de la generación de conocimiento relevante. Estamos seguros que las investigaciones y propuestas que presentamos en esta serie, ampliarán el impacto de los estudios, llegando a más públicos interesados, para contribuir al debate, a la reflexión y a la implementación de soluciones en torno a una problemática compleja y al mismo tiempo urgente para los departamentos mineros de Oruro y Potosí.

Godofredo Sandoval
Director del PIEB

Prólogo

Los yacimientos de minerales en los Andes bolivianos son, generalmente, de tipo filoniano y se explotan por minería subterránea. Estos minerales, en la mayoría de los casos, son sulfuros que en contacto con el aire de la atmósfera y el agua se oxidan generando ácido sulfúrico y promoviendo la solubilidad de metales pesados en agua. Inclusive en la minería del estaño hay presencia de sulfuros como minerales acompañantes, que de la misma manera generan ácido.

Las aguas efluentes de las explotaciones mineras tienen características ácidas corrosivas y contaminantes y se las conoce como "aguas ácidas de mina" (AMD son sus siglas en inglés). Si bien en parte se las reutiliza para el procesamiento de los minerales, es práctica inevitable hacer alguna purga y reemplazar por agua fresca. También la deposición de residuos sólidos minerales significa la evacuación de AMD. Finalmente, los desbordes por accidentes o el lavado de la lluvia también vierten AMD al medio ambiente. No sólo se trata de los efluentes directos de las minas y de los ingenios de minerales, sino que los desmontes con residuos sólidos de material de mina que se deposita a la intemperie contienen restos de minerales sulfurosos que generan drenajes ácidos.

La minería requiere agua para sus procesos, por lo que es común que se asiente cerca de ríos que a la larga resultarán contaminados.

De una u otra manera, estas aguas contaminantes llegan al medio ambiente. Se entiende que las aguas ácidas de mina desembocan en los cuerpos naturales de agua superficial pero también se infiltran en el suelo, y pueden llegar a los cuerpos subterráneos de agua. En Bolivia,

la historia de la generación de pasivos ambientales es larga, hay muchos depósitos de desechos mineros y hasta la población ha dado una denominación particular a esas aguas con olor metálico y a azufre, de colores rojizos y que son muy corrosivas: las denomina "copajira".

El proceso más difundido para el tratamiento de aguas ácidas de mina es el contacto con cal (óxido de calcio) o también con calcita (carbonato de calcio). El principio es crear condiciones alcalinas de manera que los metales pesados formen hidróxidos insolubles que se separen del agua tratada. Las desventajas de este proceso son el alto consumo de cal (por tanto, un costo elevado), la producción de residuos sólidos que luego deben depositarse y la presencia de sulfatos que no se logra disminuir en el efluente, aunque en principio es posible, dentro de ciertos márgenes, formando CaSO4; pero, por ejemplo una reducción de 80.000 partes por millón a 1.800 partes por millón, no obstante representar una considerable reducción de un 98 %, sigue siendo mayor a las cuatrocientas partes por millón que como límite señala la norma, y no satisface sus requerimientos. Por esa técnica, no se logra disminuir completamente la concentración residual de sulfatos. Para disminuir dicha concentración son necesarias técnicas avanzadas, por ejemplo la nanofiltración o el uso de filtros de membrana, como se hace en la desalinización de agua de mar para obtener agua potable.

El presente trabajo pretende disminuir la contaminación de los efluentes de aguas mineras. Sus esfuerzos se orientan, inicialmente, a que se cumpla el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica (RMCH) de la legislación ambiental sobre el sector minero metalúrgico, para obtener un efluente que cumpla con los requisitos de agua de consumo humano y para riego de cultivos agrícolas (aguas clase "A" y "B" del mencionado reglamento).

En los últimos veinte años se ha dedicado cierta atención a la reducción de sulfatos por actividad bacteriológica. La reducción de sulfatos mediante bacterias logra disminuir la concentración hasta 250 partes por millón, y se puede lograr inclusive mejores resultados optimizando el sustrato orgánico necesario para las bacterias, dependiendo también de la calidad de agua que se quiere tratar. Hoy se confía en esta tecnología para construir sistemas de tratamiento pasivo (es decir autónomos), remotos y de larga duración.

Para este fin se ha utilizado diferentes fuentes de materia orgánica y se ha encontrado que algunas no son adecuadas; por ejemplo, no es adecuado el estiércol de gallina, por su acidez; mientras que el de equino y hasta los residuos de aguas comunales dan buen resultado. Pero en los sitios mineros, que se ubican en regiones áridas de Bolivia, la disponibilidad de materia orgánica es escasa y debe provenir de la crianza de animales, de actividades agrícolas o de residuos orgánicos de actividades humanas.

El uso de estiércol de llama es una alternativa real en las regiones mineras del altiplano boliviano, y fue comprobada en un estudio de carácter exploratorio realizado en Milluni. En esa oportunidad se utilizó compost de estiércol de llama y se observó inicialmente una elevación de sulfatos en el efluente y a la larga su disminución, incipiente pero constante, en un 16%. De todas maneras, estas pruebas demostraron la capacidad del estiércol de llama para disminuir la acidez y la concentración de sulfatos, aunque la remoción de metales pesados no había sido medida aún.

El presente trabajo pretende completar ese vacío y avanzar en el tratamiento de AMD para obtener agua con fines agrícolas. Para el tratamiento de efluentes ácidos del ingenio de Machacamarca se probó tres diferentes tipos de compost como sustratos orgánicos: de estiércol de llama, de estiércol de ovino y de desechos orgánicos de cocina, todos en combinación con calcita y una posterior filtración con membrana orgánica natural (intestino de ovino). También se ha pretendido investigar el contexto de la problemática de contaminación con AMD en la subcuenca de Huanuni, que recibe primeramente los efluentes del centro minero de Huanuni y luego del ingenio de Machacamarca, los que contaminan un río que desemboca al lago Poopó y que ha sido identificado como el principal contaminante del lago.

Esta investigación, realizada principalmente por profesionales agrónomos, pretende alcanzar objetivos ambiciosos, que pueden presentarse de la siguiente manera:

- Caracterizar la flora y fauna en regiones afectadas por actividades mineras de la cuenca

- Describir las vías de contaminación de suelos y aguas con metales pesados provenientes de actividades mineras
- Caracterizar los efluentes de la planta de tratamiento de minerales de Machacamarca
- Probar un tratamiento pasivo de reducción bacteriológica de acidez, sulfatos y metales pesados
- Probar un tratamiento activo de filtración por membrana
- Verificar la afectación en las plantas por el uso de AMD y de aguas decontaminadas con las técnicas empleadas

El trabajo muestra lo dificultoso que es buscar esos objetivos, que sólo se pueden lograr de manera exploratoria. Sus resultados demuestran que disminuir la contaminación es posible; sin embargo quedan dificultades que aún deben ser solucionadas, pues no se logró reducir la concentración de sulfatos y ni siquiera con filtración de membrana y la posterior dilución del agua fresca disponible en el lugar se pudo disminuir la concentración de plomo hasta los límites que fija el RMCH (y menos con los criterios ambientales, puesto que inclusive el agua fresca ya está contaminada con plomo). En todo caso, estos resultados se pueden considerar como primeras pruebas, pues se puede optimizar las condiciones de tratamiento y realizar varias etapas de manera que se pueda satisfacer la normativa ambiental.

Los datos y antecedentes recogidos permiten comprender la magnitud del impacto ambiental y la dimensión de los contaminantes que deben ser eliminados. De allí se desprende la posibilidad de realizar tratamiento pasivo en efluentes de AMD; es decir, sin la necesidad de máquinas, energía y operadores. Surgirán nuevas interrogantes y quedarán pendientes varias tareas, pero el presente trabajo provee de antecedentes valiosos para nuevos emprendimientos.

Ing. Milton Salas
Coordinador de la Dirección
de Postgrado e Investigación Científica
de la Universidad Técnica de Oruro

Primera parte

Investigación

Introducción

Las actividades mineras del ingenio de Machacamarca generan impactos ambientales negativos en los distintos factores ambientales (aire, agua, suelo, plantas y animales) de las comunidades aledañas. Esencialmente afectan a ríos y lagos cercanos provocando acidez y presencia de metales pesados y sólidos disueltos totales en los cuerpos de agua. Y de esa manera, no sirven para regar los cultivos ni para el consumo animal y mucho menos para el consumo humano.

Hasta el momento, el ingenio de Machacamarca, que pertenece a la nacionalizada Empresa Minera Huanuni, sigue vertiendo en su proceso metalúrgico aguas residuales sin tratamiento hacia el río Machacamarca. Arsénico, fierro, aluminio, manganeso, zinc, cobre, plomo, etc. son algunos de los metales que dañan al ecosistema junto con otros sólidos disueltos. Éste no es pues un problema reciente, viene sucediendo desde hace décadas.

Por eso consideramos que es hora de proponer soluciones para mitigar la descarga de los efluentes contaminados, antes de que sea demasiado tarde.

Para ello, esta investigación propone un método sencillo y práctico, de bajo costo y con materiales que se puede adquirir en el mercado local. Se trata de desarrollar un sistema de tratamiento de las aguas residuales provenientes del ingenio de Machacamarca con métodos pasivos (compost y piedra caliza) y activos (membranas orgánicas), recuperando esas aguas para el riego de cultivos hidropónicos.

Tres etapas han marcado este minucioso trabajo de investigación: la primera etapa fue el trabajo en laboratorio para elaborar compost de llama, de ovino y de residuos de cocina, la realización de pruebas de resistencia de las membranas orgánicas y las pruebas ecotoxicológicas en cultivos de cebada. La segunda etapa tuvo que ver con la implementación en el terreno (es decir en el ingenio de Machacamarca) de una planta piloto para el tratamiento de aguas con compost (de estiércol de llama y de residuos de cocina) y con la construcción e implementación de un prototipo para el tratamiento con membranas orgánicas (tripas de ovino). En la tercera etapa se procedió al cultivo hidropónico de cebada forrajera con aguas tratadas con compost.

Durante seis meses se trabajó en la planta piloto levantada en el ingenio Machacamarca para tratar las aguas con el método pasivo de compost y piedra caliza. Lo que se obtuvo de ello fue una neutralización satisfactoria de las aguas ácidas y se redujo la concentración de los metales pesados y de los sólidos disueltos. Esa agua tratada con método pasivo fue utilizada para la ósmosis inversa con membranas orgánicas, que generó un litro de agua limpia por hora. Por otro lado, el agua tratada con compost fue usada posteriormente en el riego de cultivos de cebada en invernaderos controlados, lo que permitió obtener en doce días plantas saludables, aptas para ser consumidas por el ganado.

En esta investigación se detalla todo el proceso y se propone además la producción de cultivos hidropónicos (forrajes) en ambientes controlados con aguas tratadas del ingenio de Machacamarca, lo que podría generar en un futuro cercano la reactivación o mejora ganadera en la zona, buenos ingresos para los productores, un uso eficiente del agua de riego y la conservación o recuperación de la calidad de los suelos.

1. Problemática de la contaminación minera

La minería es una de las actividades económicas más importantes del departamento de Oruro, su explotación en socavones se remonta a varios siglos y las operaciones a cielo abierto a épocas recientes.

En la cuenca de San Juan de Sora Sora se encuentran las minas más importantes del departamento de Oruro: la Empresa Minera Huanuni, las minas Japo, Morcocala y Santa Fe. Todas ellas descargan sus efluentes hacia el río y posteriormente al lago Poopó, lo que genera impactos ambientales negativos en la cuenca, no obstante que los lagos Poopó y Uru Uru fueron declarados sitios de conservación de humedales (RAMSAR, 2002).

La mayoría de estas empresas no cuenta con un sistema de tratamiento de sus aguas residuales; en consecuencia sus descargas a los ríos contaminan las aguas (superficiales y subterráneas), los sedimentos y suelos, la vegetación (especies nativas e introducidas) e inclusive a los animales que son el sustento de las comunidades campesinas.

Pese a que existe una legislación ambiental para controlar el vertido de los efluentes, la mayoría de las empresas mineras (públicas, privadas y cooperativas) no cumple con las exigentes normas ambientales. La Ley 1333 de Medio Ambiente, en su artículo Nº 5, inciso 4), señala la optimización y racionalización del uso de aguas, aire, suelos y otros recursos naturales renovables "garantizando su disponibilidad a largo plazo", y sus artículos 37, 38 y 39 hacen referencia al uso y aprovechamiento integral de las aguas. El Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica (RMCH) en su artículo 10, incisos a), c), e) y f), indica las competencias prefecturales sobre el reuso del agua contaminada; el artículo 47 señala que todas las descargas de aguas residuales crudas o tratadas a ríos y arroyos procedentes de usos domésticos, industriales, agrícolas, ganaderos o de cualquier otra actividad que contaminen el agua deberán ser tratadas previamente a su descarga. Finalmente los valores permisibles de los diferentes parámetros están normados en el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica, un indicador para el tratamiento de aguas.

2. Proceso de generación de aguas contaminadas

El ingenio de Machacamarca, perteneciente a la Empresa Minera Huanuni, está ubicado en la cuenca San Juan de Sora Sora, en las orillas del río Machacamarca. En su proceso metalúrgico descarga

aguas residuales sin previo tratamiento en el mencionado río. Por tanto, esas aguas tienen elevada acidez, metales pesados disueltos (arsénico, cadmio, plomo, fierro, zinc, manganeso, etc.) y sólidos suspendidos disueltos. De esta manera se contribuye a la contaminación del lago Poopó.

Con todo, el ingenio cuenta con un dique de colas que le sirve para sedimentar los sólidos disueltos en alguna proporción y luego reutilizar las aguas sedimentadas en los procesos metalúrgicos de manera cíclica. No obstante, las descargas totales del ingenio hacia el río siguen teniendo una elevada acidez.

Estas actividades generan no sólo impactos negativos sobre el paisaje, sino sobre los suelos, la vegetación y las aguas superficiales y subterráneas. Los procesos de concentración y la metalurgia emiten gases y polvo, residuos líquidos y acumulaciones de desechos sólidos. De especial importancia son los desechos líquidos, que contienen elevadas concentraciones de materiales tóxicos en solución y en suspensión. Especialmente los metales pesados pueden permanecer en forma no soluble por largos periodos, pero están presentes como coloides suspendidos o son fijados por las sustancias orgánicas y minerales. Por lo tanto, su concentración en los sedimentos del fondo de las aguas o en la biota acuática indican el nivel de polución alcanzado.

Las aguas ácidas surgen del proceso de oxidación de la pirita, debido a la facilidad con que el aire entra en contacto con los sulfuros en las labores mineras, por los poros en las zonas de desmonte y por el contacto de los depósitos de relave con la atmósfera. La oxidación de la pirita da lugar a la formación de $Fe_{2+,}$ SO_4^{2-}, H+ y metales disueltos (fierro, aluminio, manganeso, zinc, cobre, plomo, etc.). Esta reacción provoca un incremento en el total de sólidos disueltos y aumento de la acidez, que se asociará a una disminución del pH (Zamora, G. 2009).

3. El problema

Existe pues la necesidad urgente de tratar estas aguas con métodos sencillos, de bajo costo y con materiales disponibles. Pues si

bien hay experiencias exitosas en Europa y Norteamérica para hacer tratamiento de aguas de mina con "*wetlands*" o aplicando drenaje anóxico en caliza (ALD); la desventaja de esos métodos es que son muy costosos.

En este caso se debe buscar otras tecnologías que empleen materiales menos costosos, que estén disponibles y sean eficientes. Los métodos pasivos[1] son una aplicación práctica para el tratamiento de efluentes de minas. Por ejemplo, la aplicación de compost y calcita para la mitigación de aguas ácidas es una técnica que requiere poco mantenimiento y por su bajo costo pueden ser asumidas por cualquier empresa durante periodos más largos (Watzlaf 1997). Además adquieren gran importancia desde el punto de vista ambiental, social, económico y tecnológico, por las siguientes razones:

– Ambiental: la mitigación por compost es un procedimiento que en forma pasiva nivela el pH del agua y reduce los metales disueltos hasta alcanzar los límites máximos permisibles que fijan las normas; el producto del tratamiento no contamina ríos, lagunas, flora o fauna.

– Social: la mitigación cuida el entorno en el que viven las comunidades o las ciudades, no degradando los suelos, no generando enfermedades y por consiguiente favoreciendo el desarrollo sostenible de la zona.

– Económico: el tratamiento activo con cal, hidróxido de calcio e hidróxido de sodio es muy costoso; en contraste, el tratamiento pasivo con compost es muy económico, basta preparar las pozas de tratamiento aerobio y anaerobio, el

1 "Tratamiento pasivo", término que no existía antes de 1990 (Cohen y Staub 1992), implica tratamiento en sistemas estáticos (sin bombeo) que contienen materias naturales (abono, piedra caliza, etc.). Los sistemas pasivos mejoran la calidad del agua por reacciones biogeoquímicas, sin el uso de reactivos sintéticos y sin la aplicación de energía externa. El tratamiento pasivo fue desarrollado en EE UU (Cohen y Staub 1992; Hedin *et al.* 1994) para contar con estrategias sostenibles para el tratamiento de aguas de mina a largo plazo, reconociendo que el drenaje contaminado de minas es un fenómeno que suele durar siglos y hasta milenios (Younger 1997). Aparte de realizar un tratamiento de aguas contaminadas, un sistema pasivo generalmente tiene valores ecológicos añadidos.

sustrato correspondiente para cada compost y se hace discurrir el agua ácida. Los compost mitigan como consecuencia de los fenómenos físico, químico y bacteriano hasta alcanzar los límites máximos permisibles.

– Tecnológico: si bien es una tecnología antigua, cuenta con innovaciones de tratamiento de aguas ácidas que se pueden aplicar en la pequeña minería y en la minería cooperativizada.

Con todos estos antecedentes, se plantea el siguiente problema: ¿hasta qué punto las aguas residuales del ingenio de Machacamarca, que tienen pH bajo (es decir elevada acidez), presencia de metales pesados disueltos (arsénico, cadmio, fierro, zinc, plomo, manganeso), elevada concentración de sulfatos y sólidos disueltos totales que son vertidos sin previo tratamiento al río Machacamarca y contribuyen a la contaminación (con aguas, sedimento y suelos) al lago Poopó, afectan la calidad de vida de las comunidades asentadas en la cuenca?

4. Objetivos de la investigación

Objetivo general:

Asumido el problema, nuestro objetivo general se ha concentrado en desarrollar un sistema de tratamiento de aguas residuales (es decir de aguas ácidas, con gran cantidad de sólidos disueltos y alto contenido de sulfatos y metales pesados disueltos) provenientes del ingenio de Machacamarca con métodos pasivos (compost y piedra caliza) y activos (membranas orgánicas) recuperando sus aguas para el riego de cultivos hidropónicos y mejorar así la calidad de vida de los pobladores.

Objetivos específicos:

– Realizar el tratamiento de aguas del efluente del ingenio de Machacamarca con métodos pasivos, empleando para ello sustratos de estiércol de llama, estiércol de ovino y residuos de cocina, adicionado a ello grava y piedra caliza.

- Efectuar el tratamiento de esas aguas con el método activo de membranas orgánicas, utilizando para el fin tripas de ovino (*Ovis aries*).
- Realizar pruebas ecotoxicológicas en cultivos regados con aguas tratadas en laboratorio.
- Cultivar especies forrajeras en invernaderos controlados (cultivos hidropónicos), con aguas que han experimentado proceso de tratamiento pasivo.
- Desarrollar un proyecto a diseño final para el tratamiento de las aguas del ingenio de Machacamarca, consistente en una planta de tratamiento, y un invernadero para el cultivo de especies regadas con aguas tratadas.

Capítulo I

Antecedentes de la investigación

1. Diagnóstico socioeconómico

El municipio de Machacamarca, en el departamento de Oruro, cuenta con dos cantones y está conformado por las siguientes comunidades:

Cuadro 1
Comunidades y centros poblados de Machacamarca

Cantón	Comunidad	Habitantes
Vicente Azcarrunz	Sora Sora	132
	Sora	144
	Realenga	395
	Cebada Mayu	420
	Chaupi Ingenio	69
	Paco Pampa	110
	Tres Pozos	115
	Aco Aco	132
	Toraca Baja	60
	Toraca Alta	24
	Carbuyo	160
	Alantañita	260
Machacamarca	Machacamarca	1.890
	Ingenio Machacamarca	269
Total de habitantes		4.180

Fuente: PDM Machacamarca 2006

Después de la capital Machacamarca, la población más numerosa es Cebada Mayu, que tiene 420 habitantes. No obstante, esos datos

que son del año 2006 deben haber variado por la reactivación de la minería, especialmente en el ingenio de Machacamarca.

1.1. Tamaño y uso de la tierra

El tamaño y el uso de la tierra en el área dispersa de Machacamarca están de acuerdo con la organización comunitaria; la distribución y el uso de los terrenos es el eje central de esa organización. Las parcelas son familiares y el resto del terreno es de la comunidad. Las áreas cultivables están divididas en *mantas*. La *manta* es un terreno lo suficientemente extenso en el que todas las familias de la comunidad tienen derecho a una parcela de tenencia individual.

Las actividades agrícolas y pecuarias son asumidas por todos los integrantes de la familia. Bien en la época de siembra y o bien en la de cosecha, padre, madre e hijos trabajan juntos. El roturado de los campos, en la mayoría de los casos, aún se realiza con tracción animal. Muy pocos acceden a ayuda mecanizada, pues como en la mayor parte del altiplano las tecnologías modernas no se aplican a la producción agrícola. A eso se suman los factores climáticos propios del altiplano y la contaminación minera que inciden en bajos productividad y rendimiento.

En la producción pecuaria destaca el ganado vacuno, del que se obtiene leche y sus derivados. Tampoco a esta actividad se aplica tecnología moderna alguna.

En los campos nativos de pastoreo destacan los pajonales de *ichu* e *iru ichu,* afectados por factores antropogénicos y fenómenos ambientales.

En la zona existen las siguientes especies introducidas: sauce llorón (*Salix babylonica*), eucalipto (*Eucalyptus globulos*), pino (*Pinus radiata*), olmo (*Ulmus glabra*), *kiswara* (*Buddleja diffusa Ruiz*) y álamo (*Populus deltoides*). Si bien no son especies representativas del lugar, su escaso número les confiere vital importancia pues de alguna manera mantienen el equilibrio de los gases de la atmósfera.

La actividad agrícola está concentrada y estratificada de acuerdo al tipo de suelo. El uso del suelo es rotativo: 40% se destina a tierras de pastoreo, 25% a tierras de cultivo y 35% son tierras contaminadas, no aptas para la agricultura. Este último aspecto se ha observado en las riberas del río San Juan, y ya en el Plan de Desarrollo Municipal de 2006 de Machacamarca los habitantes de las comunidades por donde corre este río anotan con mucha preocupación que con el pasar del tiempo sus aguas se van comiendo el terreno.

Cuadro 2
Tamaño y uso de la tierra en Machacamarca (en hectáreas)

Comunidad	Pastoreo	Cultivable	Riego	A secano	Forestal	Total
Paco Pampa	1.000	633	50	580	65	2.328
Cebada Mayu	4.725	4.000	80	320	5	9.130
Sora Sora		10	10			20
Sora	2.000	3.000		2.500		7.500
Aco Aco	2.775	740		740	2.081	6.336
Toraca Baja	180	360	10	360	320	1.230
Alantañita Caravi	800	2.000		2.000	100	4.900
Chaupi Ingenio	100	80	10	50		240
Realenga	3.300	160	60	100		3.620

Fuente: PDM Machacamarca 2006

Los seres humanos de esta zona se vinculan permanentemente con su espacio productivo mediante tecnologías agrícolas como el arado manual y otras parecidas, utilización de abonos orgánicos de su hato ganadero, tecnología complementaria de riego, utilización de pisos y nichos ecológicos con gran pericia en las comunidades del área dispersa. Producen principalmente papa, quinua, cebada, haba, arveja, hortalizas; y se dedican a la crianza de ganado vacuno, ovino, camélido, caprino. Las comunidades de Sora, Realenga, Poco Pampa y Toraca Baja son productoras de leche y sus derivados. En la zona de estudio hay dos especies de ganado: vacuno y ovino. La mayor población animal es ovina. Del total, se destina un 60% para el autoconsumo, un 25% para la venta y un 15% para aumentar la progenie.

En el área de estudio, 132,74 hectáreas agrícolas (el 35,95% del terreno agrícola total) se encuentran en zonas de la comunidad de

Alantañita Caravi; 48,16 hectáreas (el 13,04%) en la comunidad de Chaupi Ingenio; 107,89 hectáreas (el 29,21%) en la comunidad de Paco Pampa; 30,4 hectáreas (8,23%) en la comunidad de Sora Sora, y 50,17 hectáreas (el 13,58%) se hallan en la comunidad de Toraca Baja. En total, se cuenta con 369,36 hectáreas de suelo para realizar actividad agrícola.

Las superficies agrícolas de las comunidades Paco Pampa y Sora Sora actualmente son regadas por un canal que rodea las parcelas en su parte alta, y cuyas aguas se originan en una vertiente situada más al sur de la comunidad de Paco Pampa.

1.2. Sistema de producción

El sistema de producción tiene cuatro elementos fundamentales: a) el abastecimiento autónomo mediante la utilización de pisos y nichos ecológicos; b) la complementariedad lograda mediante la conexión con otras actividades económicas y la migración; c) la reciprocidad interna como elemento cultural y social para la producción y d) la ritualidad que caracteriza todo el modelo organizativo (PDM Machacamarca 2006).

En cuanto a los habitantes de la organización territorial de base (OTB) de Machacamarca, se puede decir que tienen una marcada identidad urbana, debido a su extracción obrera, a las relaciones sociales de empleado y empleador, y a su actividad minera, sobre todo. Otro factor que influye en su identidad cultural es la predominancia del idioma castellano, no obstante su pasado de raíz claramente aymara aunque en la zona se ha manifestado como fenómeno lingüístico la imposición del idioma quechua.

Cuadro 3
Producción agropecuaria en Machacamarca

Comunidad	Principales productos	Enfermedades	Ganado existente	Nº de cabezas
Paco Pampa	Papa	Gorgojo de gusano	Vacuno	200
		Trizon		
	Haba	Mancha chocolate	Ovino	1.200
	hortalizas			
Cebada Mayu	Haba	Tocta	vacuno	400
		Caperillo		
	Papa	Pullo	camélido	1.000
	Cebolla	Pullo	Ovino	400
Sora Sora	Arveja	Maraico	vacuno	5
	Haba	Maraico	ovino	80
	Papa	Jilluyca	porcino	50
		Yamaico		
Aco Aco	Papa	Rosario	vacuno	200
		Julio		
		Hojas chocolate		
	Haba		ovino	1.000
	Cebada	Polvillo	camélido	1.500
Toraca Baja	Papa	Pudrición de la papa	vacuno	80
		Mal del corazón		
	Quinua	Carbúnculos	ovino	500
	gramínea	Carbúnculos	equino	15
		Roya negra		
Alantañita Caravi	Cebolla		camélido	500
	Quinua		ovino	2.000
	Papa	Pulliki	vacuno	120
		Jancarasca		100
			porcino	
Chaupi Ingenio	Papa	Rosario	vacuno	30
	Quinua		ovino	120
	Cebada	Polvillo	camélido	18
Realenga	Papa	Rosario	vacuno	30
	Quinua		ovino	120
	Cebada	Polvillo	camélido	18
Tres Pozos	Papa	Pudrición de la papa	vacuno	80
		Mal del corazón		
	Quinua	Carbúnculos	ovino	500
	gramínea	Carbúnculos	equino	15
		Roya negra		
Sora	Papa Quinua	Yaja Polilla	bovino	270
	Cebada	Kona Kona	ovino	3.400
			camélido	400

Fuente: PDM Machacamarca 2006

1.3. Breve descripción de Huanuni

Una ley fechada el 15 de noviembre de 1912, durante el gobierno de Eliodoro Villazón, decretó la creación de una sección municipal dentro de la provincia Cercado del departamento de Oruro. Los cantones que formarían parte de esa sección municipal eran Huanuni, Sora Sora, Machacamarca, Morcocala, Cataricagua y el vicecantón Negro Pabellón. En cada uno de estos centros debía funcionar un corregidor, un agente municipal y dos alcaldes parroquiales, la capital sería Huanuni, que fue elevada a rango de Villa Huanuni[2].

En Huanuni opera hoy en día la Empresa Minera Huanuni, dependiente de la Corporación Minera de Bolivia (COMIBOL), que ejerce una marcada influencia no sólo en el desarrollo de la población del mismo nombre, sino que genera economía en diversos sectores sociales del departamento. El ingenio de Machacamarca, precisamente, pertenece a la Empresa Minera Huanuni.

En las partes altas del lado este del municipio de Huanuni, en las comunidades dispersas, los pobladores se dedican principalmente a la crianza de llama y oveja; mientras que en los centros mineros aledaños (Japo, Santa Fe y Morcocala), la población se dedica casi exclusivamente a la minería.

1.4. Breve historia de la minería en Machacamarca

El ingenio de Machacamarca tienen depósitos minerales de enormes dimensiones. Por ejemplo, el desmonte que se encuentra en la parte norte de la planta, un pasivo ambiental traído desde la mina de San José (perteneciente a la COMIBOL) representa una gigantesca fuente de contaminación.

La minería y la metalurgia en la zona se instalaron en la época de la colonia y ya desde entonces tenían impactos ambientales

---

[2] Estos datos sobre Huanuni y los que siguen sobre Machacamarca fueron tomados del libro *Capitalización en Bolivia, la estafa del siglo*, de P. Rubín de Celis, 2003.

negativos. Los españoles abrieron las primeras minas de plata en 1550; siglos después la producción minera se dedicaría a explotar estaño y más tarde zinc, plomo y plata. Según un censo realizado en 1976, en Bolivia existían unas 5.240 propiedades mineras, de las cuales entre 2.000 y 2.500 estaban en producción (sobre todo en Potosí, Oruro y La Paz). En la actualidad, esta cifra ha disminuido por la baja de precios de los minerales, pero de todos modos sigue siendo un indicador de la gran actividad minera que se desarrolla en la región. En la zona del ingenio Machacamarca y la organización territorial de base (OTB) de Machacamarca, la minería y el rescate de mineral son hoy la principal actividad económica.

1.4.1. El ingenio de Machacamarca

La fundación del ingenio de Machacamarca se remonta al 18 de diciembre de 1888. En la época de la colonia y en años posteriores la empresa funcionaba en Sora Sora y se llamaba ingenio Sora Bella. Ya en el lugar actual, durante el auge del estaño, a principios del siglo XX, la empresa estaba a cargo de mayordomos mandados por el dueño del ingenio, Mauricio Hochschild, uno de los Barones del Estaño. Para transportar el mineral se utilizaba carretas tiradas por mulas y se llevaba la carga hasta el ferrocarril que llegaba hasta la estación de Machacamarca, con recorrido Machacamarca-Uncía. Pasaron los años y se empezó a retirar a mucha gente hasta llegar a ochocientos trabajadores

Después de la nacionalización de 1952, pasó a tuición de la Corporación Minera de Bolivia (COMIBOL) y recibió financiamiento del Banco Minero. Pero el personal se fue reduciendo hasta llegar a quinientos trabajadores. Con la relocalización del año 1985, la planta se quedó con doscientos trabajadores y al final quedaron solamente cien trabajadores que se resistían al retiro forzado. El testimonio de unos de sus viejos trabajadores señala: "después de la relocalización del 85, quedaron solamente treinta trabajadores; y como forma de despedirse de su fuente de trabajo decían 'adiós Machacamarca', y se fueron con el pago de mil dólares por año, y quedaron al final solamente tres trabajadores. Con eso se cerró el ingenio y quedaron los policías en custodia de esta empresa". Con la reactivación en la nacionalización, del ingenio se hizo cargo la Empresa Minera

Huanuni en 2006; actualmente funciona con 202 trabajadores, como una sección de Huanuni. En 2006 también, la sección de concentración gravimétrica pasó a ser parte de la cooperativa unificada, en convenio con COMIBOL, pero las demás secciones funcionan a cargo de COMIBOL.

1.4.2. Tratamiento de minerales y producción del ingenio

Cuadro 4
Datos generales del ingenio de Machacamarca

Tratamiento y producción	200 ton. métricas/día
Ley	≥ al 2%
Producción día	2,5 ton. métricas finas/día
Producción mes	80 ton. métricas finas/mes
Tipos de procesos	Concentración gravimétrica Sistemas de complejos
Recuperación del mineral	60% del total
Salida de agua ingenio	20 l/seg.
Recirculación	80%, previa sedimentación
Caudal de agua utilizada para tratamiento	25m^3 por ton. tratada

Fuente: Thuska Uma 2009

Diariamente, en el ingenio de Machacamarca se realiza el tratamiento de doscientas toneladas métricas de mineral con una ley por encima del 2%; el mineral es proporcionado por la Empresa Minera Huanuni, de la que depende el ingenio.

En Machacamarca se produce entre dos a dos y media toneladas métricas finas de mineral al día, que al mes dan 75 a 80 toneladas métricas finas, si se trabaja en forma normal, y la recuperación del mineral es de 60 % del total.

El proceso de producción es conocido como "proceso gravimétrico". Las partes más esenciales en el proceso de explotación del mineral son:

Inicialmente la carga de mineral es transportada en volquetas desde los yacimientos que, ya dijimos, se encuentran en los socavones de la mina Huanuni y de otras cercanas. La carga llega hasta los

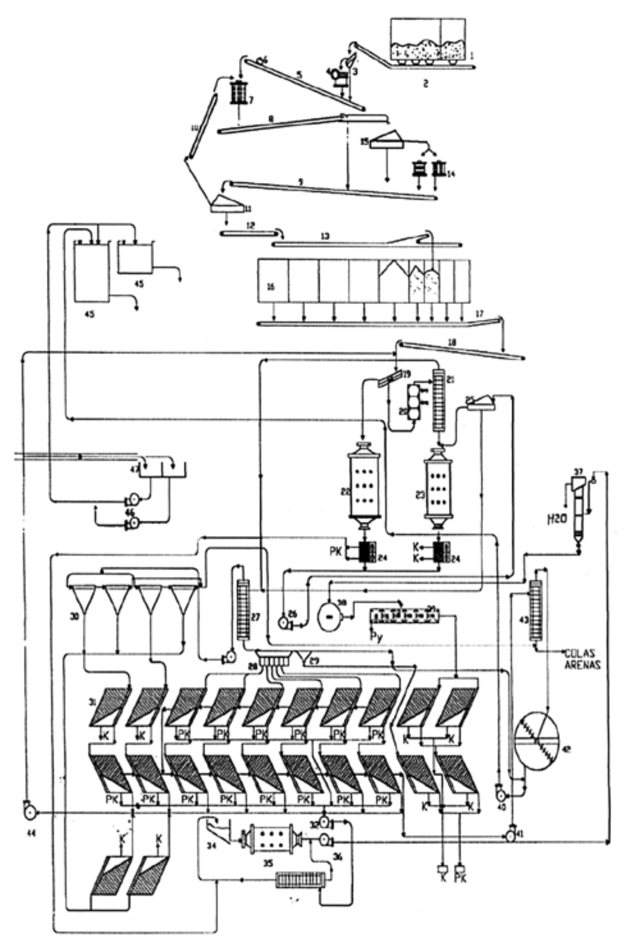
buzones de acopio, también llamados tolvas. Del buzón de acopio se lleva, por medio de correas transportadoras hacia la trituración primaria, donde el mineral es fragmentado en una trituradora de mandíbulas, llamada también chancadora, donde se obtiene granos gruesos de mineral, cuya dimensión varía entre una a una y media pulgada de diámetro. Luego pasa a través de una segunda correa transportadora a una vibradora doble. De esta máquina, el mineral es transportado por una tercera correa hacia la trituración secundaria en una chancadora cónica Symons que logra granos de 3/8 de pulgada; de esta máquina pasa por una cinta transportadora hacia otros buzones de acopio. De estos buzones, el mineral es transportado por correas hacia otra vibradora dúplex, donde parte del mineral de buena ley es procesado en los *jigs*; de éstos pasa a las clasificadoras de rastras y de allí sale con destino a los molinos de barras, de los cuales pasa después a través de cañerías hacia otros clasificadores. De estas máquinas, el mineral procesado pasa a veintitrés mesas concentradoras, a las mesas concentradoras granceras y luego hacia las mesas lameras. En estas mesas se selecciona el mineral en función de su ley.

Las lamas de estas mesas concentradoras se transportan a través de cañerías hacia las bombas lameras y éstas alimentan a otra clasificadora de rastras, cuyo producto sirve para alimentar al proceso de remolienda, es decir a otro molino; éste, por bombeo, alimenta las celdas de flotación y de éstas nuevamente al circuito de mesas concentradoras. El producto también es recuperado como mineral secundario en ley.

De las mesas concentradoras, el producto final es acopiado en buzones de concreto, y éstos son transportados en carretillas hacia una bodega barrilla para el secado correspondiente. Allí el mineral es embolsado y transportado posteriormente a la fundición de estaño de Vinto, en las afueras de la ciudad de Oruro.

En la siguiente figura podemos observar todo el proceso de producción del ingenio de Machacamarca.

Figura 1
Proceso de producción del ingenio de Machacamarca



Datos.- 1: buzón de acopio de minerales, 2: cinta transportadora, 3: vibradora, 4: trituradora de mandíbulas, 5: cinta transportadora, 6: electroimán, 7: trituradora cónica Symons, 8: cinta transportadora, 9: cinta transportadora, 10: cinta transportadora, 11: vibradora dúplex, 12: cinta transportadora, 13: cinta transportadora, 14: trituradora cónica, 15: vibradora, 16: silos de acopio de material triturado, 17: cinta transportadora plegable, 18: cinta transportadora, 19: vibradora, 20: *jigs* Bendelary, 21: clasificador de rastras, 22: molino de barras, 23: molino de bolas, 24: *jigs* Denver, 25: vibradora, 26: bomba lamera Wilfley, 27: clasificador de rastras, 28: distribuidor, 29: clasificador cónico, 30: clasificador, 31: mesas concentradoras lameras, 32: bomba Wilfley, 33: clasificador de rastras, 34: buzón de finos, 35: molino de bolas (remolienda), 36: bomba Wilfley, 37: clasificador, 38: acondicionador, 39: batería de celdas de flotación, 40: bomba Wilfley, 41: bomba Wilfley, 42: tanque espesador, 43: clasificador de rastras, 44: bomba Witfley, 45: tanque de agua, 46: bombas de agua clara, 47: tanques de almacenamiento de agua.

Fuente: Thuska Uma 2009

1.4.3. Sistemas de procesamiento de mineral y reactivos utilizados

Concentración gravimétrica: Para procesar estaño se usa concentración gravimétrica (mesas, *jigs*, ciclones, clasificadores); no se utiliza reactivos, solamente para limpiar los sulfuros se hace una mezcla con santato y con sulfato de cobre y espumante

Sistema de complejos: los complejos minerales se someten a flotación para obtener plomo plata, estaño y zinc. Se utilia los siguientes reactivos: cal y cianuro como depresores, santatos como activadores, colectores; luego se utiliza los espumantes y las celdas de flotación.

Agua[3]: el 80 % del agua utilizada es recirculada al ingenio para seguir trabajando con ella, pero antes de su reutilización se la sedimenta en el dique de colas con que cuenta el ingenio Machacamarca. Para la reutilización se utiliza bombas de diferentes capacidades y potencias.

Caudal: el caudal utilizado para los diferentes procesos es de veinticinco metros cúbicos por tonelada tratada, el mismo caudal se vierte al río. Pero las aguas vertidas al río son aprovechadas antes por los relaveros, que aprovechan los minerales y sólidos suspendidos del agua.

2. Diagnóstico ambiental

2.1. La flora silvestre

El Plan de Acción Ambiental del Departamento de Oruro (2006) menciona que toda la vegetación silvestre altiplánica tiene alto valor económico, porque el 98% de la ganadería se sustenta de ella. Las comunidades vegetales resultan de la continua interacción del factor climático con el suelo, y allí también interviene el ser humano. La distribución vegetal en pisos ecológicos (planicie-serranía) ha generado una especialización de la vegetación; a esto se debe agregar la estacionalidad de la producción silvestre herbácea, que es resultante

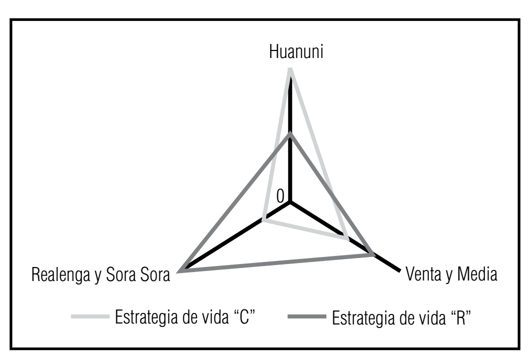
3 Estos datos del uso del agua fueron proporcionados por el personal técnico de la empresa.

del componente climático, especialmente en áreas de secano: son el principal sustento de la ganadería.

La vegetación de la zona se encuentra constituida por especies xerófitas, que toleran condiciones de prolongada sequía, y especies halófitas, que toleran concentraciones más o menos elevadas de sales en los suelos.

Entre los estudios más relevantes sobre la flora silvestre en esta región está el de Transredes (2001), que identificó 35 especies semileñosas y herbáceas con tres géneros representativos. Pero el estudio más representativo fue realizado por la Dirección de Posgrado e Investigación Científica de la UTO (DPIC) en 2008, mediante convenio con la prefectura. Este estudio identificó la vulnerabilidad de las comunidades vegetales (figura 1) frente a las actividades agropecuarias de la zona; los efectos más negativos se localizaron en las comunidades de Realenga y Sora Sora, en la comunidad de Ventaimedia y luego Huanuni, gran centro minero cuyas actividades afectan sobre todo al recurso hídrico provocando una bioacumulación en especies vegetales de interés forrajero.

Figura 2
Vulnerabilidad de comunidades vegetales



Fuente: DPIC - UTO, 2009

En un estudio denominado *Evaluación de la calidad de agua, sedimentos y totora en el lago Uru Uru*, realizado por Juan Carlos Montoya y Milton R. Pérez en 2009, se menciona que en la zona existen siete unidades de vegetación, descritas en orden decreciente de cobertura:

- Formaciones de gramíneas bajas y medianas
- Áreas sin vegetación y semidesiertos de suelos salinos
- Formaciones gramíneas altas (pajonales de *Festuca orthophylla* o paja brava) y matas de *Stipa* (*ichu*)
- Formaciones arbustivas densas siempreverdes en planicies y laderas (matorrales de *thola*)
- Matorral mixto de *Parastrephia* con matas de gramíneas (*tholar*-pajonal)
- Mosaico de vegetación natural remanente y campos de cultivos en descanso con pastoreo
- Formaciones de gramíneas altas y arbustos en arenales
- Formaciones arbustivas abiertas en laderas (matorral abierto en ladera)

Los nombres arriba mencionados hacen referencia a la fisonomía de las comunidades vegetales, a su forma de crecimiento o a la presencia de una determinada especie. Existen, por ejemplo, especies que crecen en suelos salinos: la alta evaporación que provoca la acumulación de sales de diferente composición en la superficie del suelo y la salinidad o alcalinidad edáfica causada por estas sales pueden ser toleradas por un grupo reducido de especies, por lo que su presencia indica esas condiciones.

Cuadro 5
Especies indicadoras de suelos salinos

Familia	Especie
Gramineae	*Distichlis humilis* Phil. Grene
Frankeniaceae	*Frankenia triandra* E.J.
Chenopodiaceae	*Atriplex deserticola* *Sarcocornia pulvinata* *Suaeda foliosa* Moq.
Juncaginaceae	*Tetraglochin sp.*

Fuente: Montoya y Pérez 2009

También el estudio de Montoya y Pérez señala que en la zona existen 62 especies de plantas vasculares y una especie no vascular.

Cuadro 6
Lista de especies vegetales terrestres en la zona del lago Uru Uru

Familia	Especie	Familia	Especie
Cactaceae	*Maihueniopsis sp. (= Opuntia s.l.)*	*Gramineae*	*Aristida asplundii Henr.*
Caryophyllaceae	*Arenaria sp.*	*Gramineae*	*Bromus catharticus Vahl*
Caryophyllaceae	*Cardionema ramosissima (Weinm.)*	*Gramineae*	*Chondrosum simplex (Lagasca) Kunth*
Caryophyllaceae	*Cerastium sp.*	*Gramineae*	*Deyeuxia brevifolia J.S. Presl.*
Caryophyllaceae	*Spergularia sp.*	*Gramineae*	*Deyeuxia curvula /Wedd) Pilg.*
Chenopodiaceae	*Atriplex cf. deserticola Phil.*	*Gramineae*	*Deyeuxia heterophylla Wedd.*
Chenopodiaceae	*Atriplex sp.*	*Gramineae*	*Deyeuxia sp.*
Chenopodiaceae	*Chenopodium quinoa Wild.*	*Gramineae*	*Distichlis aff. Spicata (L) Greene*
Chenopodiaceae	*Sarcocornia pulvinata (R.E.Fr.) A.J. Scott*	*Gramineae*	*Distichlis humilis Phil.*
Chenopodiaceae	*Sarcocornia sp.*	*Gramineae*	*Festuca dolichophylla J. Presl.*
Chenopodiaceae	*Suaeda foliosa Moq.*	*Gramineae*	*Festuca orthophylla Pilg.*
Chenopodiaceae	*Suaeda sp.*	*Gramineae*	*Hordeum muticum J.S. Presl.*
Compositae	*Achyrocline sp.*	*Gramineae*	*Lycurus phleoides Kunth*
Compositae	*Baccharis incarum Wedd.*	*Gramineae*	*Muhlenbergia fastigiata (Presl.) Henr.*
Compositae	*Conyza sp.*	*Gramineae*	*Nassella sp.*
Compositae	*Gamochaeta erythractis (Wedd.) Cabr.*	*Gramineae*	*Stipa leptostachya Griseb.*
Compositae	*Gamochaeta sp.*	*Gramineae*	*Stipa aff. Frigida*
Compositae	*Gnaphalium versatile Rusby*	*Gramineae*	*Indeterminada*
Compositae	*Heterosperma sp.*	*Juncaginaceae*	*Triglochin sp.*
Compositae	*Hymenoxys robusta (Rusby) Parker*	*Leguminosae-Papilionaceae*	*Adesmia sp.*
Compositae	*Hypochoeris elata (Wedd.) Griseb*	*Leg. Pap.*	*Astragalus arequipensis Vog.*
Compositae	*Hypochoeris taraxacoides (Meyen & Wald) Ball*	*Leg. Pap.*	*Astragalus garbancillo Cav.*
Compositae	*Parastrephia lepidophylla (Wedd) Cabr.*	*Leg. Pap.*	*Medicago sativa L.*
Compositae	*Parastrephia lucida (Meyen) Cabr.*	*Leg. Pap.*	*Trifolium amabile Kunth*
Compositae	*Senecio humillimus Sch. Bip.*	*Malvaceae*	*Taras sp.*
Compositae	*Senecio sp.*	*Plantaginaceae*	*Plantago myosurus L.*
Cruciferae	*Lepidium chichicara Desv.*	*Plantaginaceae*	*Plantago sericea Ruiz & Pav.*
Cruciferae	*Lepidium sp.*	*Plantaginaceae*	*Plantago sp.*
Euphorbiaceae	*Chaemaesyce sp.*	*Roseceae*	*Tetraglochin cristatum (Britton) Rothm.*
Frankeniaceae	*Frankenia triandra E.J. Remy*	*Umbeliferae*	*Azorella diapensioides A. Gray*
Geraniaceae	*Erodium cicutarum (L.) L* Herit*	*Verbenaceae*	*Junellia minima (Meyen) Mold.*
Bryophyta-Musci	*Indeterminado*		

Fuente: Transredes 2001; Montoya y Pérez 2009

Pese a la similitud de la vegetación, hay un componente externo que de alguna manera hace que existan diferencias. Las características del suelo (diferencias en la humedad y temperatura edáficas, la concentración de sales y otras) condicionan el desarrollo de la vegetación.

2.2. La fauna silvestre

Estudios realizados por la Dirección Departamental de Recursos Naturales y Medio Ambiente de la Prefectura de Oruro (2005) identificaron la existencia de diferentes especies animales en la zona de estudio como *Liolaemus, Apodemus, Phoenicoparrus, Pseudalopex, Vicugna, Pterocnemia, Rhynchotus;* de la misma manera se determinó que las aves y los roedores son considerados plagas para las especies vegetales. La constante caza de mamíferos, entre ellos el gato andino, el quirquincho, la taruca, la vicuña, y de aves destinadas a uso comercial y alimento (suris, perdices, parihuanas) ha conducido a estas especies al borde de la extinción en varios sitios. La destrucción o reducción de especies carnívoras ha permitido el incremento de especies pequeñas de pájaros y ratones que afectan a la producción agrícola. La actividad humana (en la ganadería, la agricultura, la cacería y la minería) ha modificado el hábitat silvestre y ha destruido determinadas formas vitales de fauna y sus medios de sustento. El impacto ambiental sobre muchas especies, vulnerables a tales perturbaciones, está promoviendo su descenso poblacional, lo que afecta no sólo ya a intereses económicos sino también ecológicos, pues hay especies en franca extinción.

Una variada fauna nativa de vertebrados, compuesta por cuatro grupos conformados a su vez por doce especies de reptiles, veintiocho de mamíferos, 113 de aves y siete de peces prefieren las formaciones vegetales arbustivas y los humedales. De ahí nace la importancia de la conservación y protección de ese hábitat, pues muchas especies de aves y mamíferos de uso alimenticio y comercial ya no abundan.

Según Montoya y Pérez (2009), la zona de Machacamarca se caracteriza por su clima de puna seca y por grandes extensiones de suelo salino que permiten el crecimiento de vegetación halófita.

La fauna del lugar, compuesta por pequeños mamíferos, tiene un marsupial, un edentado, roedores miomorfos y roedores caviomorfos (véase el cuadro 7). El orden más abundante y diversificado es el de los roedores (*Rodentia*), que significa el 88,9% de las especies; en él se encuentran los ratones, las vizcachas, los cuises o cuyes (falsos conejos) y los topos (conejos de cerro).

Cuadro 7
Lista probable de pequeños mamíferos en la zona de Machacamarca

Orden común	Familia	Especie	Nombre
Marsupialia	*Didelphidae*	*Thylamys pallidor*	Achito
Xenarthra	*Dasypodidae*	*Chaetophractus nationi*	Quirquincho
Rodentia – Myomorpha	*Sigmodontinae*	*Oligoryzomys destructor*	Ratón
Rodentia – Myomorpha	*Sigmodontinae*	*Akodon albiventer berlepschii*	Ratón
Rodentia – Myomorpha	*Sigmodontinae*	*Akodon boliviensis*	Ratón
Rodentia – Myomorpha	*Sigmodontinae*	*Andinomys edax edax*	Ratón
Rodentia – Myomorpha	*Sigmodontinae*	*Auliscomys boliviensis*	Ratón
Rodentia – Myomorpha	*Sigmodontinae*	*Auliscomys pictus*	Ratón
Rodentia – Myomorpha	*Sigmodontinae*	*Auliscomys sublimis*	Ratón
Rodentia – Myomorpha	*Sigmodontinae*	*Calomys lepidus*	Ratón
Rodentia – Myomorpha	*Sigmodontinae*	*Eligmodontia puerulus*	Ratón
Rodentia – Myomorpha	*Sigmodontinae*	*Phyllotis xanthopygus rupestres*	Ratón
Rodentia – Caviomorpha	*Caviidae*	*Galea musteloides*	Pampa huanco
Rodentia – Caviomorpha	*Caviidae*	*Cavia tschudii nana*	Pampa huanco
Rodentia – Caviomorpha	*Caviidae*	*Microcavia niata*	Pampa huanco
Rodentia – Caviomorpha	*Chinchillidae*	*Legidium viscacia cuvieri*	Vizcacha
Rodentia – Caviomorpha	*Octodontidae, Ctenominae*	*Ctenomys ipimus*	Topo
Rodentia – Caviomorpha	*Octodontidae, Ctenominae*	*Ctenomys leucodon*	Topo

Fuente: Transredes, volumen 3, 2001; C. E. Brockmann: *Perfil ambiental de Bolivia*, ("Fauna silvestre"), 1986; Montoya y Pérez 2009

La mayoría de las especies de roedores que viven en la zona circundante al lago Uru Uru son miomorfos, pertenecientes a la subfamilia *Sigmodontinae* (*Rodentia: Cricetidae*), la cual evolucionó en Sudamérica produciendo una serie de formas que ocuparon un nicho equivalente al de los insectívoros, ausentes en este continente (Reig 1980, 1987).

3. Método pasivo para la remediación ambiental

3.1. El compost

El compostaje es un proceso biológico termofílico, donde la materia orgánica es descompuesta por una gran cantidad de microorganismos. Bacterias, hongos, protozoos, ácaros, miriápodos, entre otros organismos aeróbicos, digieren los compuestos orgánicos transformándolos en otros más simples (Rynk 1992). La obtención de un buen compost depende fundamentalmente de la composición y la preparación de la materia orgánica de partida, que puede experimentar variaciones en función de factores diversos, del proceso de compostaje y maduración y del procesado final (refinado y depuración). En general, se suele tratar de residuos orgánicos de distinta naturaleza. A continuación un esquema de clasificación de los residuos compostables según distintos criterios.

Por su *naturaleza química*: residuos orgánicos, ricos en carbono, ricos en nitrógeno, residuos minerales (en realidad, coadyuvantes del compostaje), residuos básicos, sales minerales (fosfatos, carbonatos, sulfatos).

Por su *estado físico*: residuos sólidos (pajas, basuras, maderas), residuos semisólidos (efluentes agroalimentarios y ganaderos).

Por su *origen*: procedentes de actividades domésticas, procedentes de actividades agrícolas.

Los residuos agroindustriales y ganaderos contienen una gran cantidad de materia orgánica que puede ser usada con fines agrícolas. Algunos de estos residuos requieren que la fracción orgánica sea separada de los materiales inertes, pero en general todos requieren una reducción de tamaño y algunos un acondicionamiento químico-biológico.

Los materiales de soporte son variados: vegetales leñosos como residuos de poda de zonas verdes o de jardinería, aserrín, paja, materiales previamente compostados (EPA 1999), trozos de neumáticos, astillas de pino, viruta de madera y desechos agrícolas (Uribe 2005).

Algunos materiales de soporte actúan también como enmienda al contribuir al mejoramiento de las características químicas del producto final, como es el caso de la cascarilla de arroz que, además de mejorar la estructura de la pila, aporta potasio (WEF 1998).

En el caso de materiales de difícil degradación, se hace necesario adicionar una fuente de calor que contenga un alto contenido de materia orgánica fácilmente biodegradable. Habitualmente se emplea el estiércol de ganado, de pollo y caballos; vegetación, como árboles y hojas, y residuos, como melazas (Eweis *et al.* 1999).

3.1.1. Etapas del proceso de compostaje

El proceso de compostaje puede dividirse en cuatro periodos, de acuerdo con la evolución de la temperatura (APROLAB 2007):

- *Mesófilo*. La masa vegetal está a temperatura ambiente y los microorganismos mesófilos se multiplican rápidamente. Como consecuencia de la actividad metabólica, la temperatura se eleva y se producen ácidos orgánicos que hacen bajar el pH.
- *Termófilo*. Cuando se alcanza una temperatura de 40º C, los microorganismos termófilos actúan transformando el nitrógeno en amoníaco y el pH del medio se hace alcalino. A los 60º C estos hongos termófilos desaparecen y aparecen las bacterias esporígenas y actinomicetos. Estos microorganismos son los encargados de descomponer las ceras, las proteínas y las hemicelulosas.
- *De enfriamiento*. Cuando la temperatura es menor a 60º C, reaparecen los hongos termófilos que reinvaden el mantillo y descomponen la celulosa. Al bajar de 40º C, los mesófilos también reinician su actividad y el pH del medio desciende ligeramente.
- *De maduración*. Es un periodo que requiere meses a temperatura ambiente, durante los cuales se producen reacciones secundarias de condensación y polimerización.

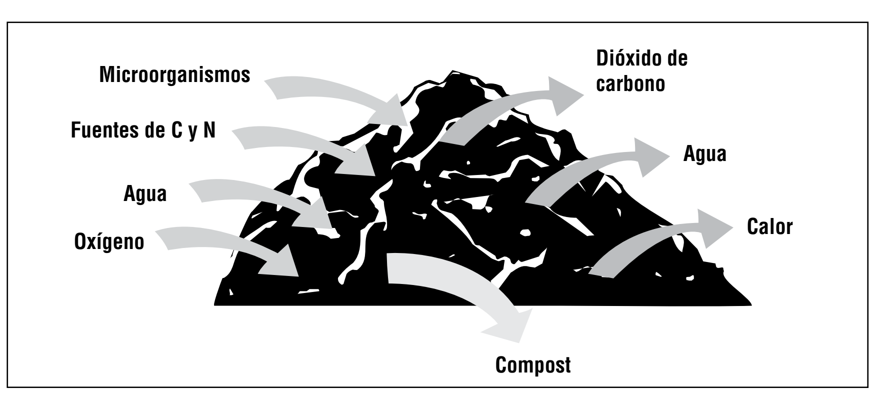
Gráfico 1
Etapas del proceso de compostaje

Fuente: Aprolab 2007

3.1.2. Factores que condicionan el proceso de compostaje

El proceso de compostaje se basa en la actividad de microorganismos que viven en el entorno, que son los responsables de la descomposición de la materia orgánica. Para que estos microorganismos puedan vivir y desarrollar su actividad descomponedora se necesita condiciones óptimas de temperatura, humedad y oxigenación.

Figura 3
Proceso de compostaje



Fuente: Thuska Uma 2009

Son muchos y muy complejos los factores que intervienen en el proceso biológico del compostaje, que está a su vez influenciado por

las condiciones ambientales, los tipos de residuos a tratar y el tipo de técnica de compostaje empleada. Los factores más importantes son: la humedad, la relación carbono-nitrógeno (C/N) y la temperatura. No obstante, el control de la mayor cantidad posible de parámetros en el proceso garantiza los mejores resultados.

Cuadro 8
Condiciones óptimas del proceso de compostaje

Condiciones óptimas		
Parámetro	**Rango razonable**	**Rango referido**
Relación C/N	20-40	25-30
Humedad	40-65	50-60
Temperatura	40-65	55-70
pH	5,5-9	6,5-8,5
Tamaño de la partícula	13 mm	13 mm

Fuente: Proyecto medioambiental sobre reutilización de la materia orgánica realizado por el colectivo KIMA BERDEA; "Evolución de la temperatura (-) y pH (--) durante las diferentes etapas del compostaje" (Costa 1991)

3.2. Tratamiento pasivo de aguas ácidas de mina

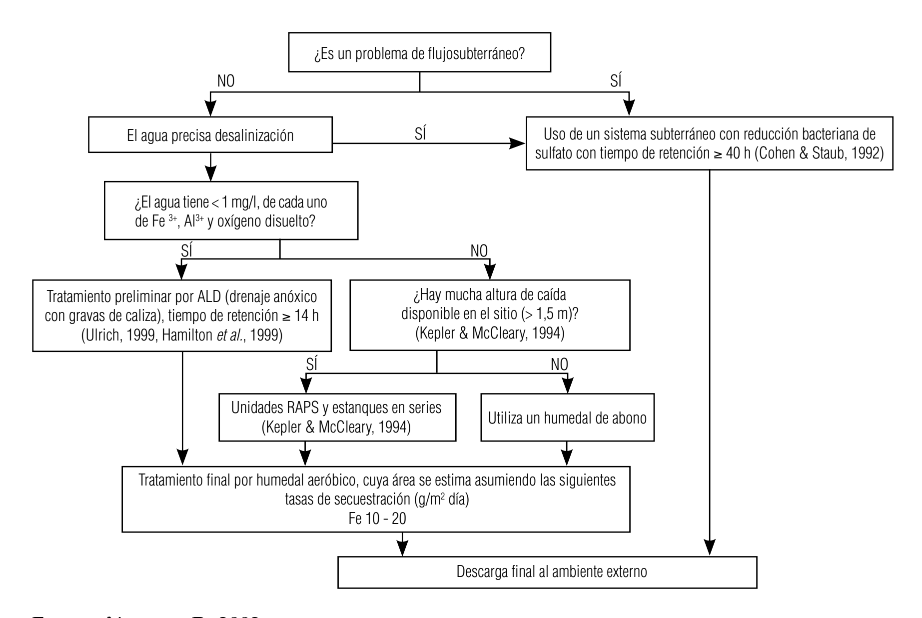
Para el tratamiento de aguas contaminadas por actividad minera, nos enfocamos en las técnicas de unidades RAPS y humedal de abono para proponer una nueva técnica pasiva basada en el uso de compost elaborado con material local junto a áridos alcalinos (en este caso, calcita).

El método pasivo para tratamiento de aguas de mina ha evolucionado, desde hace dieciséis años, inicialmente en Estados Unidos. Existen muchos ejemplos de la mala aplicación de humedales aeróbicos para aguas ácidas de minas (por ejemplo en Bannister 1997). Los humedales aeróbicos son inapropiados para el tratamiento de aguas inclusive ácidas porque los procesos estimulados en ellos resultan en la hidrólisis del hierro, un proceso que libera ácido protónico (ecuación a). Sin embargo, una vez que se ha corregido la acidez de una agua de mina por otro tipo de sistema pasivo, se puede usar un humedal aeróbico como paso final para remover los últimos miligramos de hierro por litro de agua. También tecnologías pasivas

para otras variedades de aguas de mina están ya experimentando avances rápidos en el contexto del proyecto de investigación "Pirámide" (Comisión Europea, 50º Programa Marco).

El esquema siguiente presenta la lógica de selección de las variables opcionales.

Esquema 1
Selección de procesos de tratamiento pasivo para aguas ácidas de minas

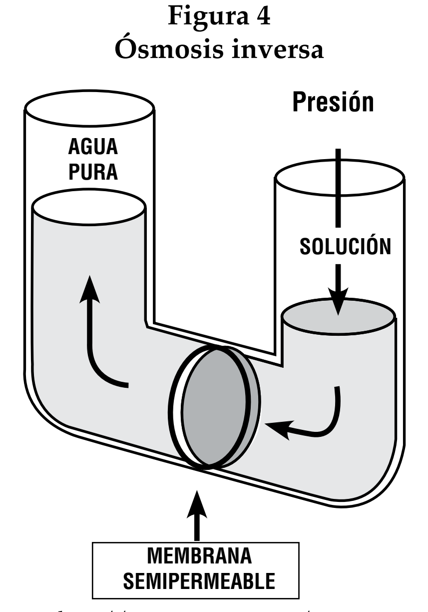


Fuente: Younger P., 2002

4. Tratamiento de aguas con método activo: ósmosis inversa

Otro sistema de tratamiento de aguas contaminadas es la ósmosis inversa, es decir la posibilidad de invertir el fenómeno de la ósmosis aplicando una presión superior a la presión osmótica de la solución en el lado de solución más concentrada para provocar el paso del agua en sentido inverso. Por lo tanto, la *ósmosis inversa* es el proceso por el cual se obtiene una solución diluida de una solución concentrada invirtiendo el proceso natural de ósmosis (véase http://im-university.com/osmosis-inversa.html).

Figura 4
Ósmosis inversa



Fuente: http://im-university.com/osmosis-inversa.html

La ósmosis inversa consiste en separar un componente de otro en una solución mediante fuerzas ejercidas sobre una membrana semipermeable. En la ósmosis inversa, se fuerza al agua a cruzar la membrana semipermeable, dejando las impurezas detrás y filtrando así pequeñas partículas, metales pesados, sustancias tóxicas, sustancias disueltas, microorganismos, exceso de sales, etc. La permeabilidad de la membrana puede ser tan pequeña que prácticamente todas las impurezas, moléculas de la sal, bacterias y virus son separados del agua.

La ósmosis inversa es un proceso de separación por membrana de flujo transversal. Las sustancias retenidas en la corriente de descarte en el proceso de separación pueden ser orgánicas o inorgánicas, con tamaños del orden de un angstrom. Su retención depende de su peso molecular, su geometría, su carga y otros factores.

Entre 1950 y 1970, se llevó a cabo innumerables trabajos para implementar el uso de la ósmosis inversa en la desalación de aguas salobres y agua de mar. A partir de 1970, esta técnica comenzó a ser competitiva, y en muchos casos superior a algunos de los procesos

y operaciones unitarias usados en concentración, separación y purificación de fluidos. La ósmosis inversa tiene las siguientes características:

- Permite remover la mayoría de los sólidos (inorgánicos u orgánicos) disueltos en el agua.
- Remueve los materiales suspendidos y microorganismos.
- Realiza el proceso de purificación en una sola etapa y en forma continua.
- Es una tecnología simple, que no requiere de mucho mantenimiento.
- El proceso se realiza sin cambio de fase, con el consiguiente ahorro de energía.
- Es modular y necesita poco espacio.

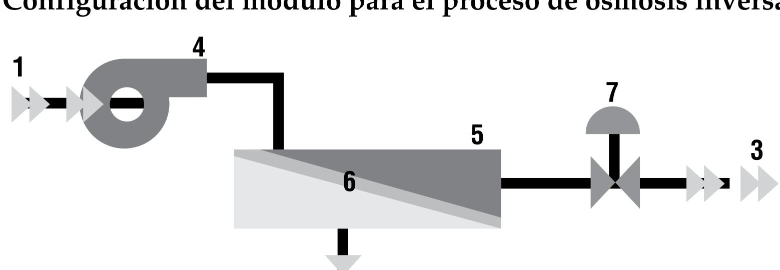
La ósmosis inversa se aplica a un campo muy vasto; se la utiliza en el abastecimiento de aguas para usos industriales y consumo de poblaciones; en el tratamiento de efluentes municipales e industriales para el control de la contaminación o recuperación de compuestos reutilizables; en la industria de la alimentación, para la concentración de alimentos, y en la industria farmacéutica, para la separación de proteínas, eliminación de virus, etc.

4.1. La membrana orgánica (tripa delgada de ovino)

La membrana que se puede utilizar para la operación de ósmosis inversa es una tripa, material de origen natural proveniente del intestino delgado de cualquier ovino; pero antes de utilizarla es necesario comprobar que dicho material sea semipermeable para que pueda ser utilizado.

La unidad de operación en la que se dispone la membrana para su utilización se conoce como *módulo.* Esta unidad consta de la membrana, la estructura de soporte, la entrada de alimentación, la salida de concentrado y el punto de extracción del permeado (según el detalle que consta en http://www.labquimica.wordpress.com/2008/05/03/osmosis-inversa/).

Figura 5
Configuración del módulo para el proceso de ósmosis inversa



(1) Agua bruta (2) Agua osmotizada (3) Rechazo concentrado (4) Bomba de alta presión
(5) Módulo de ósmosis (6) Membrana semipermeable (7) Válvula

Fuente: http://www.labquimica.wordpress.com/2008/05/03/osmosis-inversa

La membrana, al dejar pasar solamente el agua pura, hace que el agua de alimentación se vaya concentrando en sales y éstas son eliminadas en continuo, arrastradas por un caudal de agua. Como puede verse en la figura 4, la ósmosis inversa es un proceso continuo de separación o concentración y como tal puede emplearse, dependiendo del líquido que se quiera recuperar, ya sea el producto o el concentrado. Para el tratamiento de aguas, el fluido que interesa recuperar es el producto y permite la eliminación de sales disueltas, con lo cual se logra la desalinización y potabilización de aguas salobres o residuales.

Con este proceso se alcanza tres objetivos principales: se asegura en la membrana una circulación suficiente del fluido que va a ser tratado, para limitar los fenómenos de concentración, polarización y depósito de partículas; se produce un módulo compacto, uno que provea máxima superficie de permeado por unidad de volumen, y se evita cualquier fuga entre los compartimientos de alimentación y permeado.

5. Breve apunte sobre la ecotoxicología

La ecotoxicología es la ciencia que estudia el efecto tóxico provocado por sustancias químicas producidas por actividades mineras o industriales que causan daños irreversibles a los organismos vivos, especialmente a las poblaciones y comunidades vegetales. Permite comprender los efectos que causan los contaminantes a los

organismos bióticos, estudia el destino y las consecuencias de los contaminantes en un ecosistema, trata de explicar las causas y los daños ocasionados, particularmente a la vegetación y por tanto a los animales y seres humanos, y prevé los riesgos probables.

La ecotoxicidad es el resultado del estrés tóxico que afecta al ambiente. Por eso la ecotoxicología se basa en el estudio de los organismos bióticos, esenciales para apreciar la calidad ambiental, ya que éstos son los que se encuentran expuestos a los efectos combinados de la ecotoxicidad (Blaise, Bermingham y Van Coillie 1985).

Para estimar los riesgos de la contaminación ambiental en el ser humano, y ya que las reacciones bioquímicas en muchos organismos son semejantes, se usa ciertos organismos a modo de monitores que reaccionan más rápidamente que el hombre ante determinada contaminación. En un nivel 1, indican riesgo para el ser humano por la situación del ambiente; en un nivel 2, indican riesgo para el ser humano por función reemplazante (en ensayos con organismos con reacciones semejantes), en un nivel 3 indican riesgo para el ser humano por pasos directos a su red trófica.

Los efectos de los contaminantes pueden ser reversibles e irreversibles, según se esquematiza en el siguiente gráfico.

Gráfico 2
Efectos de los contaminantes



Fuente: Blaise, Bermingham y Van Coillie, 1985

En la zona de Machacamarca no se ha realizado estudios sobre ecotoxicología. Sin embargo, se puede mencionar que en el campo internacional (Jonson, Cooke y Stevenson 1994) se ha estudiado el efecto fitotóxico del cromo, el mercurio y el plomo (Cr^{6+}, Hg^{2+} y Pb^{2+}) en forma de dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$), cloruro de mercurio (Cl_2Hg) y acetato de plomo ($(CH_3C00)_2Pb$), respectivamente, sobre el crecimiento radicular de cuatro especies de plantas superiores terrestres: cebolla (*Allium cepa L., Liliaceae*), betarraga (*Beta vulgaris L., Chenopodiaceae),* arroz *(Oriza sativa L., Poaceae)* y rabanito *(Raphanus sativus L., Brassicaceae*) en 192 horas (ocho días) de exposición. Para cada metal y para cada especie de planta se realizó bioensayos de toxicidad subagudos estáticos usando un diseño experimental en bloques completos al azar: seis concentraciones y ocho repeticiones, con un total de 240 semillas por bioensayo.

En un estudio, Bidwell (1993) menciona que las plantas tienen peculiares formas de absorber nutrientes tanto del sustrato como del medio ambiente, y de esta manera hacen intercambio de gases a través de los estomas de la hoja, donde se observa que la difusión del dióxido de carbono (CO_2) tiene lugar usualmente a través de las superficies foliares que poseen estomas; en proporción al número de estomas hay una eficiente absorción que se da por el tamaño de los poros abiertos.

Pese a que los organismos presentan sensibilidades variables frente a la toxicidad, los ensayos han demostrado su eficiencia en los últimos años. Los ensayos de toxicidad se clasifican por:

- La duración del ensayo (corto, mediano o largo plazo).
- El método de adición de las soluciones a ensayar (estadístico, con recirculación, con renovación o flujo de pistón).
- Los objetivos del ensayo (cumplimiento de normas, permisos de descarga, estudios en zonas de mezcla).

En el estudio sobre la calidad del agua del lago Uru Uru realizado por Juan Carlos Montoya y Milton Pérez en 2009, se indica la presencia de varios elementos tóxicos en el lugar. Se trata de químicos que pueden agruparse según su solubilidad, frecuencia y toxicidad para

el medio ambiente; de esta manera se genera grupos de elementos no críticos, tóxicos pero insolubles o no frecuentes, y finalmente, tóxicos y relativamente disponibles:

Cuadro 9
Agrupación de elementos químicos según su solubilidad, frecuencia y toxicidad para el medio ambiente

No críticos			Tóxicos pero insolubles o no frecuentes		Muy tóxicos y relativamente disponibles		
Na	C	F	Ti	Ga	Be	As	Au
K	P	Li	Hf	La	Co	Se	Hg
Mg	Fe	Rb	Zr	Os	Ni	Te	Tl
Ca	S	Sr	W	Rh	Cu	Pd	Pb
H	Cl	(Al)*	Nb	Ir	Zn	Ag	Sb
O	Br	Si	Ta	Ru	Sn	Cd	Bi
	N		Re	Ba		Cr	Pt

* Aluminio tóxico para organismos de suelos y aguas

Fuente: UTO, INCO SRL, Worley Parsons Komex y Lab. de Limnología-UMSA, 2008; Montoya y Pérez 2009

Entre los elementos analizados por el mencionado estudio se encontró cuatro muy tóxicos y relativamente disponibles: arsénico, cadmio, zinc y plomo (As, Cd, Zn y Pb), y entre los elementos no críticos se encontró también cuatro elementos: sodio, calcio, magnesio y hierro (Na, Ca, Mg y Fe).

Capítulo II

Metodología de la investigación

1. Ubicación del estudio

La investigación que se recoge en este libro se realizó en tres zonas del departamento de Oruro: en ambientes de la ciudadela universitaria la elaboración de compost, ósmosis inversa y el cultivo de cebada forrajera; en el ingenio de Machacamarca el tratamiento de aguas del ingenio con compost y piedra caliza, y en la localidad de Sora Sora el cultivo de cebada forrajera en invernaderos controlados.

Imagen 1
Ubicación del área de estudio

Fuente: Google earth, elaborado por Thuska Uma, 2009

La ciudadela universitaria, perteneciente a la Universidad Técnica de Oruro, se encuentra a dos kilómetros al sud de la ciudad de Oruro (17º 59′ 41,47″ latitud sud y 67º 08′ 12,15″ de latitud oeste) a 3.706 metros sobre el nivel del mar. Su clima va de semifrío a frío, con una humedad relativa anual promedio de 48%, temperatura mínima de -4º centígrados, una media de 12º centígrados y máxima de 20º centígrados.

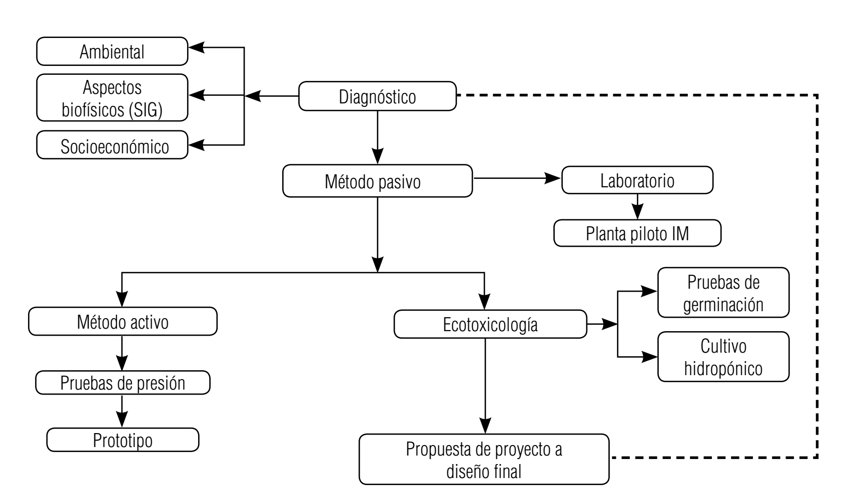
El ingenio de Machacamarca pertenece al municipio de Machacamarca, que a su vez pertenece a la provincia Pantaleón Dalence; está también al sud de la ciudad de Oruro, a veintinueve kilómetros de distancia, (18º 9′ 37,71″ latitud sur y 67º 00′ 28,87″ longitud oeste).

La comunidad de Sora Sora pertenece al municipio de Machacamarca, está al sudeste de la ciudad de Oruro, aproximadamente a 32 kilómetros, entre la carretera Oruro-Huanuni (18º 10′ 19,69″ de latitud sud y 66º 57′ 55,26″ de latitud oeste).

2. Proceso metodológico

El procedimiento metodológico de esta investigación tuvo dos fases, una fue la etapa experimental y en la otra se elaboró un proyecto.

Esquema 2
Investigación y experimentación



Fuente: Thuska Uma 2009

La etapa experimental se inició con un diagnóstico socioeconómico y ambiental y la elaboración de un sistema de información geográfica. Luego se procedió a elaborar el compost de tres sustratos (estiércol de llama, estiércol de ovino y residuos de cocina), en laboratorio se procedió a tratar con ese compost las aguas del ingenio y se instaló una planta piloto en los ambientes del ingenio. Las aguas tratadas fueron usadas en pruebas ecotoxicológicas y en el cultivo hidropónico de cebada forrajera y también para ósmosis inversa con membranas orgánicas (tripas de ovino).

3. Los diagnósticos

3.1. Elaboración del diagnóstico socioeconómico

Para hacer este diagnóstico se tomó en cuenta el aspecto social y económico de las comunidades de influencia de la actividad minera, el ingenio de Machacamarca y los relaveros. Para ello se usó como herramienta de trabajo la investigación-acción-participación (Rojas 2008), un enfoque investigativo y una metodología de investigación aplicada a estudios sobre realidades humanas.

El proceso metodológico que se siguió fue:

- Recopilación de información secundaria; fuentes documentales provenientes del municipio de Machacamarca, ONGs, fundaciones, consultoras y del Instituto Nacional de Estadística (INE), de la prefectura de Oruro, del Centro de Ecología y Pueblos Andinos (CEPA), de la Empresa Minera Huanuni, de la facultad de ciencias agrícolas, pecuarias y veterinarias de la Universidad Técnica de Oruro.
- Recopilación de información primaria mediante encuestas, entrevistas y testimonios recogidos a los pobladores de las comunidades, trabajadores del ingenio de Machacamarca y los cooperativistas relaveros. Se encuestó un total de 244 personas en las distintas comunidades: 47 en Machacamarca, 95 en el ingenio de Machacamarca, 36 a trabajadores de rescate de mineral (los relaveros), 26 en Alantañita Caravi, 20 en Realenga J. Urqu, 17 en Realenga cruce, 13 en Sora Sora, 11 en Chaupi

Ingenio, 11 en Toraca Baja, 10 en Paco Pampa, 9 en Sora y 8 en Toraca Alta. Las entrevistas se realizaron a informantes clave, como el responsable de medio ambiente de la Empresa Minera Huanuni, el superintendente del ingenio de Machacamarca y las autoridades municipales y originarias. Los testimonios se recogieron de pobladores de las comunidades aledañas, de los trabajadores del ingenio y los cooperativistas relaveros.

3.2. Elaboración del diagnóstico ambiental

La metodología empleada para este diagnóstico estudió tres aspectos, que a continuación se detalla.

1. En una primera etapa se procedió a la georreferenciación de mapas cartográficos en un sistema de información georreferenciada, utilizando la herramienta del SIG (Sistema de Información Geográfica), su digitalización para obtener segmentos con información de curvas de nivel, vías camineras, parcelas agrícolas, poblaciones, centros mineros, etc.; sobre el mapa geológico, también se digitalizó las unidades presentes en el área del proyecto para identificar los procesos de formación de suelo que se habrían suscitado en la zona; también se trabajó sobre imágenes satélite, que fueron georreferenciadas y sometidas a un tratamiento espectral para diagnosticar la cobertura vegetal utilizando el *índice de vegetación normalizado* (NDVI). Producto de esta actividad se llegó a obtener un mapa geológico, un mapa actitudinal, un mapa de pendientes, un mapa de cobertura vegetal, un mapa de parcelas agrícolas y una visión en tres dimensiones de la zona de influencia del proyecto.

2. En una segunda etapa se realizó un reconocimiento de campo y un levantamiento de datos GPS (*Global Positioning System*, o sistema de posicionamiento global, mediante satélite) de los aspectos estudiados en la primera etapa para verificar las unidades estudiadas.

3. En una tercera etapa, ya en trabajo de gabinete, se realizó la validación de los aspectos estudiados y la información recogida en campo, para modificarlos o verificarlos.

3.2.1. Evaluación de aguas y suelos

La toma de muestras de aguas y suelos se determinó mediante la ayuda de una imagen satelital, en la cual se ubicó los lugares más afectados por los procesos del ingenio y se consideró el grado de contaminación en que se encuentra el agua en las comunidades cercanas. Con estos antecedentes se realizó los estudios del agua y del suelo bajo parámetros que se definió para la evaluación en sitio y laboratorio.

Muestreo de aguas: para el muestreo de aguas se procedió según este detalle: se procedió a lavar el envase antes de tomar la muestra, se recogió el agua en botes esterilizados y en bolsas plásticas para la muestra, se llenó la botella con la cantidad de agua adecuada, se la rotuló y registró.

Muestreo de suelos: la evaluación de suelos se realizó también mediante la recolección de muestras en las comunidades cercanas a la zona de estudio, en un rango de cero a 45 centímetros de profundidad.

Para proceder a eso se asumió las recomendaciones que señalan tres enfoques básicos para el muestreo (American Public Health Association and American Warter Works Association 1946):

> 1) El muestreo selectivo, que consiste en escoger sitios sobre la base de diferencias obvias o típicas (visibilidad de un derrame de químicos, cambios en el color del suelo, áreas de perturbación física anterior o áreas sin vegetación o con vegetación muerta); 2) el muestreo sistemático o de rejilla, donde los puntos de muestreo se ubican a distancias uniformes entre sí, para que haya total cobertura de la población específica; 3) El muestreo al azar, que permite toda combinación posible de unidades de muestras; su número está sólo limitado por el tamaño de la muestra; el medio más común para minimizar la desviación en la selección de sitios de muestreo es asignar un número a cada unidad de población y extraer unidades de muestras de una tabla de dígitos al azar.

Selección del sitio de control: los sitios de control son importantes para entender el valor de la información de muestreo. Se deberá seleccionar lugares que tengan características comunes con las áreas contaminadas, con excepción de la fuente de contaminación. Los sitios del entorno se muestrean por su cercanía en época y en espacio al lugar del sitio contaminado. Los sitios de control se emplean para demostrar si el sitio afectado está contaminado o si es verdaderamente distinto al entorno del área. Existen dos tipos de sitios de control: a) los locales y b) los del área, y sus diferencias radican principalmente en la cercanía que hay del sitio de control al sitio de muestreo ambiental. Los sitios de control locales están generalmente adyacentes o muy cerca de los sitios donde se obtiene muestras para ensayos.

Documentando los protocolos de muestreo: los protocolos de muestreo son descripciones escritas de procedimientos específicos a seguirse en la recolección, empacado, etiquetado, preservación, transporte, almacenamiento y documentación de muestras. Cuanto más específico sea un protocolo de muestreo, menor será la posibilidad de error o de interpretaciones erróneas.

Evaluación de suelos (calicatas): en este proceso se indica las recomendaciones más importantes para realizar la evaluación de un suelo; esta información es muy importante en el muestreo y la evaluación de suelos para conocer las características agrícolas y poder determinar parámetros topográficos y su formación.

3.3. Estudios de flora y fauna

En esta parte, el diagnóstico se dividió en dos áreas: flora fauna silvestre y flora y fauna domesticada.

3.3.1. Flora silvestre

En lo que se refiere a flora silvestre, para hacer una comparación adecuada, se asumió como áreas de control las zonas altas aledañas, con características vegetativas similares. De este modo, se obtuvo una

estimación de la magnitud de los impactos ambientales al comparar los registros que están dentro del área de influencia directa (zona baja) del proyecto con áreas de influencia indirecta (zona alta).

Se usó el método de transectos variables propuesto por Foster *et al*. (1995) para realizar evaluaciones rápidas de la vegetación. Este método toma un número estándar de individuos en vez de una superficie estándar y no requiere medidas precisas. El método consiste en muestrear un número determinado de individuos a lo largo de un transecto con un ancho determinado y un largo definido por el número estándar de individuos a muestrearse.

Con este método se puede muestrear todas las plantas o clases de plantas separadas por formas de vida (árboles, arbustos, bejucos, hierbas, epifitas), familias (por ejemplo palmeras de una sola especie); también se puede hacer agrupaciones por estratos (plantas del dosel, del estrato alto, del estrato medio, del sotobosque). Para considerar el número de plantas a muestrear, se debe tomar en cuenta que usualmente es mejor hacer muchos muestreos pequeños que pocos muestreos grandes. Foster *et al.* (1995) mencionan que cincuenta individuos de muestreo para cada clase de plantas puede ser un número con el cual se puede hacer varios muestreos representativos en un solo día.

En las comunidades de Paco Pampa hasta Toraca Baja, Toraca Alta y Alantañita, la evaluación de la vegetación nativa se realizó utilizando el método de transectos variables: se ubicó puntos cada doscientos metros y en cada punto se evaluó un metro hacia atrás y otro hacia adelante y veinte metros a los costados, con lo cual se tuvo un área total de cuarenta metros cuadrados (Foster *et al.* 1995).

Se usó también la evaluación fitosociológica. El método fitosociológico, originalmente, fue introducido en Europa por Braun Blanquet (1979) y se basa en la siguiente metodología: realiza la inventariación de especies vegetales en un área homogénea, limitada, donde la vegetación sea representativa; además, la inventariación se debe realizar, en lo posible, en un periodo de máxima fluoración para registrar la totalidad de la flora presente. Para determinar el área se realiza un inventario florístico sobre la base de una parcela muestral básica de

un metro cuadrado, la cual se duplica según el área en que se desea evaluar la vegetación. Si el área es muy pequeña, existe el riesgo de no obtener una evaluación completa, mientras que si el área es muy grande existe la probabilidad de incurrir en falta de homogeneidad, lo que puede provocar una distorsión del muestreo. Luego se confecciona un gráfico, en cuya abscisa se indica el área y en la ordenada el número de especies, trazando la curva correspondiente. Después se dibuja la recta tangente a la curva, cuyo punto se proyecta en forma perpendicular a la abscisa para obtener el área mínima.

La abundancia y frecuencia de las especies vegetales en una comunidad se puede investigar mediante la aplicación de una matriz de distribución de las especies en el área. La frecuencia de las especies debe realizarse mediante el inventario de la vegetación con un cuadrante reticulado, determinando la distribución en relación con la dominancia/abundancia de las especies vegetales. La representatividad de cada especie se estima por su cobertura (la superficie que ocupa cada especie de las partes aéreas de todo los individuos presentes en un área determinada). Posteriormente se debe designar las coberturas parciales y el grado de sociabilidad para cada especie vegetal en un área determinada.

En las comunidades de Alantañita y Chaupi Ingenio, la evaluación se hizo con el método fitosociológico, con el que se evaluó la abundancia y frecuencia de las especies vegetales. En ambas comunidades, el área a trabajar fue de 1 m^2, 50 m^2, 100 m^2, 150 m^2 y 200 m^2 para especies semileñosas y herbáceas. El inventario de la vegetación se realizó en un cuadrante determinado.

3.3.2. Fauna silvestre

Para capturar información de fauna silvestre habitualmente se usa índices de abundancia, índices de riqueza y diversidad, análisis de datos de captura por redes neblineras y entrevistas. Toda estas metodologías permiten obtener información sobre las especies existentes. Pero son costosas, prolongadas; y por el tiempo y el costo que implican, frente a la prioridad de este proyecto, no se las utilizó. Para obtener información de la fauna silvestre en la zona de estudio se recurrió a información secundaria.

3.3.3. Flora cultivada y fauna domesticada

Para obtener datos de la flora cultivada y de la fauna doméstica se diseñó una metodología cualitativa, que permitió recolectar estudios de caso, introspección sobre experiencias personales, historias de vida, entrevistas, observación, análisis de textos de observación, biografías y muchas más. Los estudios cualitativos se caracterizan por la búsqueda y el análisis de la interpretación. En la búsqueda se identifica causas y en el ánalisis se establece el significado de los eventos, del comportamiento y de la práctica.

Mediante las entrevistas se pudo obtener respuestas concretas y realizar observación directa sistemática y estructurada. Al mismo tiempo se realizó la georreferenciación con la ayuda de GPS para digitalizar las coordenadas en imágenes satelitales utilizando imágenes Landsat 5. También se recurrió a información secundaria, como el Plan de Desarrollo Municipal de Machacamarca (2006) y el Diagnóstico de la Subcuenca de Huanuni (que indica que el sistema de producción agrícola en la zona es manual, con tracción agrícola y mecanizada para la producción de forraje y la yunta para la producción de cultivos destinados al autoconsumo).

La producción forrajera es la de mayor importancia en la zona. Los principales cultivos son cebada (*Hordeum vulgare*) *y* alfalfa (*Medicago sativa*) que se destinan a la alimentación del ganado vacuno. El sistema de producción en gran parte es mecanizado (es decir, se uso tractores), pero la gran limitante en la zona es la contaminación minera.

4. Métodos usados para tratar aguas (método pasivo)

4.1. Elaboración del compost

La siguiente figura muestra el proceso experimental de tratamiento de aguas que se usó en el ingenio de Machacamarca, desde el dique de colas, pasando por el método pasivo con compost hasta el método activo de tratamiento por ósmosis inversa con membranas orgánicas.

Figura 6
Flujo del tratamiento de aguas del ingenio de Machacamarca

COMPOST
CALIZA
Poza 1
Poza 2
MÉTODO PASIVO
Bomba de agua
Membrana semipermeable
Ósmosis inversa
Efluente
MÉTODO ACTIVO

Fuente: Thuska Uma 2009

El tratamiento de agua con método pasivo se dividió en dos etapas: en la primera se elaboró compost con tres sustratos (estiércol de llama, estiércol de ovino y residuos de cocina), en la segunda se implementó una planta piloto en los ambientes del ingenio Machacamarca, cuyas aguas fueron utilizadas para riego de cebada en cultivos hidropónicos y para el método activo.

4.2. Fase de elaboración del compost

Procedimiento llevado a cabo en laboratorio. Para este fin se cavó tres pozas de cuatro metros de largo por 1,20 metros de ancho y 75 centímetros de alto y se las cubrió con plástico de color negro para que el calor del compost no se escape y para mantener la humedad adecuada pues en épocas de lluvia y helada el compost se pudre si hay exceso de humedad.

Para hacer el compost se partió del mismo proceso pero con distinta materia prima: restos orgánicos (aserrín y desperdicios de cocina) y abonos de origen animal (excrementos).

El compost de desechos orgánicos de cocina se elaboró según el método de la pila de Indore (Seymur, 1980), que consiste en la trituración de los materiales a pedazos de entre uno a dos centímetros (para ello se usó cuchillo y tijeras de podar), pues a menor tamaño hay mayor velocidad de descomposición, menos costosa y más duradera.

También se pulverizó estiércol de llama y de oveja para que se descompongan más rápido (la composición química: MS: 70,32; N: 1,43; PO: 75; Ca: 0,43; MO: 92,46.

Luego se preparó ramas y hojas de pino y pasto para la base de las pozas, y se procedió a forrarlas con plástico de color negro. Antes de depositar los materiales se introdujo dos kilos de cal para incrementar la temperatura, pues la época en que se realizó el compost fue en invierno. Con las ramas y hojas de pino y pasto se fabricó lechos de diez centímetros de espesor en cada poza, para permitir la ventilación, para que el material no se compacte y para facilitar la entrada de microorganismos. Luego se introdujo los materiales, llenando dos tercios de la capacidad total de las pozas. En el caso de los desechos orgánicos de cocina se mezcló dos partes de materiales húmedos por una de secos, para el compost de estiércol se usó estiércol seco y pulverizado.

Para fabricar compost de estiércol ovino, se procedió a diseminar en el fondo de una poza forrada con plástico negro tres palas de cal, luego se echó restos de paja y pasto, a continuación una capa de aserrín de diez centímetros de alto (que en volumen equivale a 0,48 metros cúbicos), luego veinte centímetros (1,04 metros cúbicos) de estiércol de oveja; y se repitió el proceso introduciendo otra capa de aserrín de diez centímetros de alto y otra capa de veinte centímetros de estiércol ovino, hasta lograr una altura de sesenta centímetros; se regó encima con veinticinco litros de agua para lograr la humedad originadora del proceso de degradación y se cubrió todo con una capa de tres centímetros de tierra cernida para que la temperatura se eleve o se mantenga. Para finalizar se cubrió las pozas con plástico para impedir que escapara el calor generado en su interior.

El contenido de elementos nutritivos, en porcentaje de materia seca, en el estiércol de ovino: N (nitrógeno): 35% (nitrógeno), P_2O_5 (óxido fosfórico): 14%, K_2O (óxido de potasio): 5%, MgO (óxido de magnesio): 12%, S (azufre): 3%.

Para hacer compost de estiércol camélido (de llama), lo mismo que para el compost de ovino, se diseminó en el fondo de la poza forrada con plástico negro tres palas de cal (dos kilogramos), se construyó una cama de cinco centímetros de alto con restos de cultivos de paja o césped (0,24 metros cúbicos), luego se echó una capa de aserrín de diez centímetros de alto (0,52 metros cúbicos), una capa de veinte centímetros (1,04 metros cúbicos) de estiércol de camélido ya cernido,

y se repitió este proceso por cada capa o sustrato hasta lograr una altura de sesenta centímetros de alto. Antes de cubrir estas capas con tierra se regó con veinte litros de agua para lograr la humedad que empezara el proceso de degradación. Finalmente se echó una capa de tres centímetros (0,15 metros cúbicos) de tierra cernida para impedir que escape la temperatura y se cubrió todo con plástico. El contenido de elementos nutritivos, en porcentaje de materia seca, en el estiércol de ovino: N (nitrógeno): 100%, $P_2O_{5,}$ (óxido fosfórico): 17% K_2O (óxido de potasio): 18%, MgO (óxido de magnesio): 18%, S (azufre): 0%.

Para hacer compost con desechos orgánicos de cocina se perforó la base del plástico, esto para que los líquidos se escurrieran y no se mantuvieran en la base, pues de lo contrario habría mayor cantidad mayor de agua en la base. Se roció el fondo de la poza con tres palas de cal (dos kilogramos), una capa de tres centímetros de alto (0,14 metros cúbicos) de restos de cultivo a modo de aireador, una capa de quince centímetros de alto de aserrín (0,72 metros cúbicos). Los desechos de cocina producen mucho líquido, y con el aserrín se evita la putrefacción de la capa de abajo. Luego se depositó una capa de veinte centímetros de alto (0,96 metros cúbicos) de restos de cocina, otra capa de aserrín de quince centímetros, luego otros veinte centímetros de restos de cocina. Finalmente se cubrió con una capa de tres centímetros de tierra cernida para que la temperatura se mantenga o se eleve y se cubrió la poza con el plástico. Las proporciones de los desechos orgánicos de cocina usados para la elaboración del compost son:

Cuadro 10
Porcentaje de materiales en el compost de restos de cocina

Descripción	Porcentajes
Chala de choclo	40%
Cáscara de papa	20%
Cáscara de zanahoria	10%
Cáscara de cebolla	5%
Cáscara de plátano	5%
Cáscara de tomate	3%
Cáscara de zapallo	3%
Restos de cultivos (pasto, hojas de pino y ciprés)	4%
Mezcla de restos de domésticos diarios (cáscara de haba, arveja, brócoli, apio acelga, etc.)	10%

Fuente: Thuska Uma 2009

Después de llenar esta poza se procedió a añadir distintos materiales siguiendo siempre el mismo procedimiento: materiales húmedos y secos en proporción de dos a uno. Cuando no se disponía de materiales húmedos (por la época del año) el material seco se dejó acumulando hasta conseguir material húmedo, o bien se añadió material seco y después se aplicó agua.

Mediante la mezcla de materiales húmedos y secos se pudo lograr una relación adecuada de carbono y nitrógeno (C/N).

Cuadro 11
Relación carbono/nitrógeno

Hojas caídas secas (10 cm)	60
Residuos de comida (10 cm)	15
Césped verde (10 cm)	20
Promedio (60 + 15 + 20) / =31,7	

Fuente: Thuska Uma 2009

4.3. Seguimiento, parámetros y tiempo del proceso de compostaje

Los factores que intervienen en el compostaje son complejos, pero se puede señalar como importantes la temperatura, la humedad y el pH.

El tiempo también es una variable importante en el proceso de la degradación. Tiempos prolongados o cortos determinan un buen compost, por eso debe considerarse la granulometría del material a compostar; es decir, a mayor tamaño de partículas mayor es el tiempo de compostación y a menor tamaño también es menor el tiempo de compostación. La bibliografía indica que un compost se elabora en tres meses.

El propósito de los humedales construidos para el tratamiento de aguas es permitir que ocurra la reacción química y biológica natural en el sistema de tratamiento y no en el cuerpo de recepción de agua. Allí los microorganismos desempeñan un papel importante. El compost proporciona un área superficial para microbios y para

transportar el oxígeno, produciendo una zona de oxidación donde adicionalmente existen poblaciones microbianas. Este complejo de vegetación y microbios (bacterias) tiene una alta eficiencia en modificar nutrientes, metales y otros compuestos.

4.4. Fase de laboratorio

Una vez listo el compost, se viajó al ingenio de Machacamarca para realizar el muestreo del agua y realizar las pruebas de laboratorio, donde se procesó dos baldes de agua por cada tipo de compost del siguiente modo: un balde procesado por 24 horas y otro balde procesado por 72 horas[4]. Durante el proceso, se tomó datos de pH y conductividad eléctrica del agua antes durante y después del tratamiento.

Después de veinticuatro horas de permanencia del agua ácida en compost y piedra caliza, se abrió el grifo de los tres primeros recipientes (baldes) conteniendo los tres primeros tratamientos ($T1_{1,}$ $T2_1$ y $T3_1$) para vaciar el agua tratada sin alterar ni remover el compost ni los metales que se precipitaron en el proceso del tratamiento.

Se recogió las aguas que permanecieron veinticuatro horas en los tres tratamientos de compost y se llevaron al laboratorio Spectrolab para analizar químicamente la cantidad de metales presentes.

En lo que se refiere a las otras aguas, después de haber permanecido 48 horas en los tres tratamientos de compost y piedra caliza, se recogió de ellas una muestra de cien mililitros para realizar lecturas de pH, temperatura y conductividad eléctrica. Finalmente, luego de 72 horas de permanencia de las aguas ácidas en compost y piedra caliza se abrieron los grifos de los tres recipientes restantes, se procedió a realizar lecturas de temperatura, pH y conductividad eléctrica y se las llevó al laboratorio para su análisis.

4 $T1_1$ = estiércol de camélido por 24 horas. $T2_1$ = restos de cocina por 24 horas. $T3_1$ = estiércol de ovino por 24 horas. $T1_2$ = estiércol de camélido por 72 horas. $T2_2$ = restos de cocina por 72 horas. $T3_2$ = estiércol de ovino por 72 horas.

4.5. Planta piloto

Las pruebas establecieron que el sustrato de llama y los residuos de cocina tenían mejor eficiencia en reducir los metales pesados y elevar el pH. Con estos resultados, se decidió trabajar en una planta piloto para el tratamiento de aguas en los predios del ingenio de Machacamarca de la siguiente manera: primero se identificó el área de construcción, donde se ubicarían tres pozas de tratamiento: la poza de la lamela para sedimentar el agua, la poza de la compostera y la poza de recepción de agua tratada. Se instaló tuberías en la planta de tratamiento y grifos de regulación de caudales desde el dique de colas hasta la poza de agua tratada. Se preparó la compostera con grava, piedra caliza, el compost y una lámina de agua sin tratamiento. El tratamiento propiamente dicho del agua del ingenio de Machacamarca fue a razón de un metro cúbico por día. Durante seis meses se monitoreó los diversos parámetros físicos y químicos (pH, conductividad eléctrica, turbidez, metales pesados, demanda quimica de oxigeno y otros) y se procedió al acopio de agua tratada y sin tratamiento para el cultivo de cebada forrajera en invernaderos controlados, en la localidad de Sora Sora y los ambientes de la Facultad de Agronomía de la UTO, y también para la ósmosis inversa.

Imagen 2
Planta piloto en el ingenio de Machacamarca

Fuente: Thuska Uma 2009

La planta piloto funciona de la siguiente manera: las descargas de los efluentes del agua del ingenio llegan al dique de colas a razón de veinte litros por segundo; el agua se sedimenta durante un tiempo; se conduce las aguas del dique de colas hacia las dos lamelas que sirven para sedimentar el agua, regulando la toma de agua a razón de un metro cúbico por día. Posteriormente, el agua pasa hacia la compostera donde permanece veinticuatro horas para que los microorganismos actúen en reducir los metales pesados y elevar su pH. Finalmente, el agua fluye hasta la poza de agua tratada, donde se almacena para abastecer tanto a los cultivos hidropónicos como para el tratamiento con ósmosis inversa (ver imagen 2).

En la compostera preparada en la segunda poza se distribuyó grava, piedra caliza y sustratos de la siguiente manera:

Figura 7
Preparación del compost en la planta piloto

10 cm de agua
50 cm de compost
40 cm de piedra caliza
10 cm de grava

Fuente: Thuska Uma 2009

Como se puede observar en la figura precedente, la poza tenía diez centímetros de grava para evitar taponamientos en las tuberías de salida con agua ya tratada. La piedra caliza dentro del tanque de tratamiento alcanzó una altura de cuarenta centímetros (1,2 metros cúbicos) con un tamaño de uno a dos centímetros de diámetro. Posteriormente se protegió con una malla milimétrica de dos por 1,50 metros, para impedir la entrada del compost a los espacios porosos de la piedra caliza y evitar el taponamiento y la falta oxígeno, ayudando a que se incremente la presión parcial del dióxido de carbono (CO_2) para maximizar la disolución de la caliza. De este modo, el agua ácida de mina circula por el interior de los poros de la caliza generando alcalinidad (HCO_3- + OH-); este oxígeno desencadena una serie de reacciones de oxidación e hidrólisis que dan como re-

sultado la precipitación de oxihidróxidos metálicos y elevando el pH del agua. A través de la malla milimétrica se introduce una capa de compost, en una altura de cincuenta centímetros que equivalen a 1,5 metros cúbicos. Entre los diversos procesos que se dan en el compost se tiene: la oxidación de metales, la precipitación y la coprecipitación, además de la filtración de la materia en suspensión, la absorción de metales y el intercambio iónico en los materiales del sustrato.

Las bacterias presentes en la columna de agua, por el compost, pueden catalizar la oxidación de metales, particularmente la oxidación del fierro, de $Fe^{2}+$ a $Fe^{3}+$, (hierro divalente y hierro trivalente) y en menor medida del manganeso (Mn), según las siguientes reacciones:

$$Fe^{2}+ + 0,25\ O_2 + H+ \longrightarrow Fe^{3+} + 0,5\ H_2O$$

$$Mn^{2}+ + 0,5\ O_2 + 2\ H \longrightarrow Mn^{4+} + H_2O$$

La finalidad del compost elaborado con estiércol de camélido y restos de cocina es eliminar el oxígeno disuelto en el agua, reducir el $Fe^{3}+$ a $Fe^{2}+$ (proceso que sucede en capas inferiores del compost) y generar alcalinidad mediante procesos químicos o con intervención de microorganismos sulfato-reductores. La materia orgánica es una importante fuente de energía para el metabolismo microbiano y el principal elemento en la reducción del sulfato.

Las principales bacterias anaerobias sulfato-reductoras son *Desulfomaculum* (Gram positiva) y *Desulfovibrio*, que son capaces de utilizar como fuente de energía para su metabolismo las reacciones que se producen en la materia orgánica del sustrato (CH_2O) y el sulfato disuelto en el agua intersticial. Durante la degradación de la materia orgánica en la elaboración del compost también existen otras bacterias como *Desulfomicrobium, Desulfobulbus, Desulfobacter, Desulfobacterium, Desulfococcus, Desulfosarcina, Desulfomonile, Desulfonema, Desulfobotulus y Desulfoarculus*, cuyas temperaturas óptimas de crecimiento están entre veinte a cuarenta grados centígrados y a un pH mayor a 5,5.

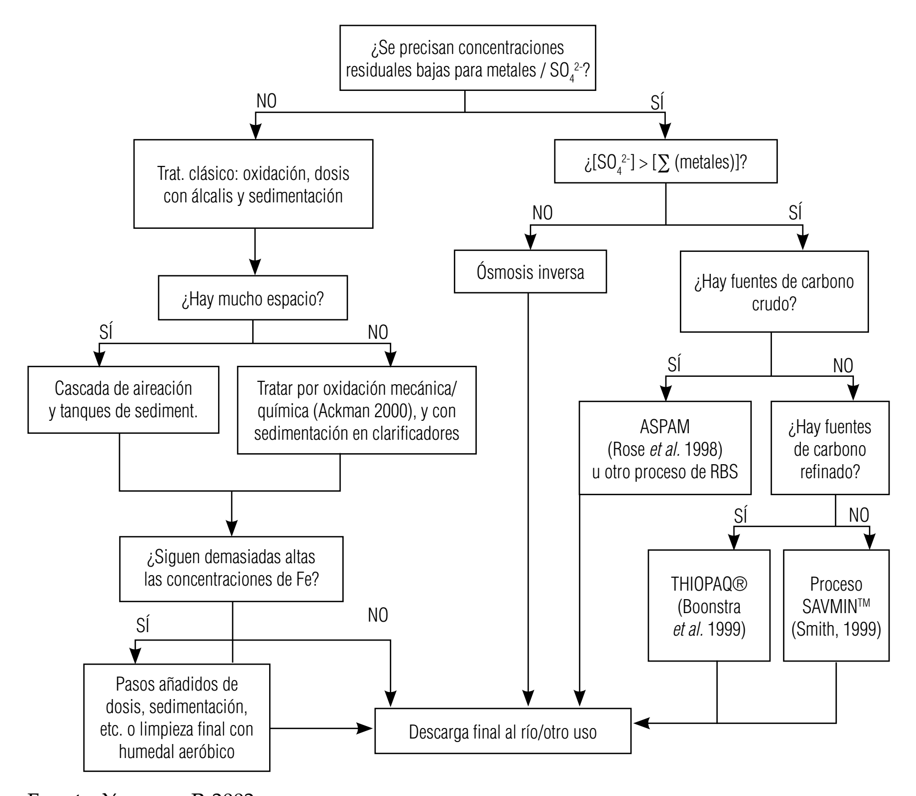
La reducción biológica del sulfato consume acidez (H+) y reduce el sulfato a sulfuro metálico insoluble como parte de la actividad metabólica de las bacterias; la precipitación de estos sulfuros remueve metales del agua dando como resultado su neutralización.

En la parte superior de la poza se mantiene de manera constante una película de agua de diez centímetros de alto para el trabajo permanente de los microorganismos del compost.

5. Tratamiento con el método activo

En la técnica de ósmosis inversa, el requisito principal es la menor concentración de sulfatos con relación a los metales pesados de aguas de minas (criterio que se está considerando para el presente proyecto de investigación). El esquema siguiente presenta la lógica selección de los procesos activos más utilizados para el tratamiento de aguas ácidas:

Esquema 3
Selección de procesos de tratamiento activo para aguas ácidas de minas



Fuente: Younger, P. 2002

Una vez seleccionado el proceso, la aplicación de la ósmosis inversa consiste en usar membranas orgánicas (tripas de ovino). El desarrollo del proyecto de investigación está basado en el esquema metodológico siguiente.

Esquema 4
Metodología del tratamiento por ósmosis inversa

Fuente: Thuska Uma 2009

Para el tratamiento de aguas por el método de ósmosis inversa, se trabaja con agua previamente tratada por el método pasivo que limpia el agua que sale hacia el dique de colas en el ingenio. El análisis químico da a conocer las propiedades de esas aguas, los contaminantes que contienen y en qué proporción. El pH, los sólidos suspendidos, los sólidos disueltos, los sólidos disueltos totales, la conductividad y turbidez de la solución de alimentación se midieron en laboratorio con los equipos adecuados. Los iones contaminantes que presenta el agua y los miligramos por litro fueron analizados por el laboratorio químico Spectrolab.

Para realizar el proceso de tratamiento, todos los parámetros deben estar de acuerdo con las condiciones de alimentación establecidas para la ósmosis inversa: el agua a tratar no debe contener sólidos sedimentables, la concentración no debe exceder las 5000 partes por millón, la conductividad no debe superar los diez milisiems (10 mS), el pH debe estar comprendido entre 4 y 7 y no debe presentar turbidez elevada.

Las variables que intervienen en el proceso de ósmosis inversa son: caudal, presión, tiempo de operación, concentración, conductividad, pH, sólidos disueltos totales, turbidez, temperatura, el flujo de agua y la permeabilidad del soluto; algunas de esas variables se evalúan teóricamente y otras de manera experimental.

Por su lado, la membrana debe ser capaz de resistir las presiones a las que se va a someter la solución, ser suficientemente permeable al agua para que el flujo que proporcione sea elevado y debe tener la capacidad de rechazar un porcentaje alto de sales para que el producto sea de buena calidad. También se debe tener en cuenta las características de la tripa delgada de ovino: diámetro, espesor, estructura, semipermeabilidad, resistencia, tiempo de vida útil, selectividad y productividad. Como se sabe, el intestino delgado de ovino tiene tres segmentos: duodeno, yeyuno e íleon. Para el tratamiento de aguas, se utiliza el yeyuno, pues el duodeno tiene un diámetro muy pequeño y es poco elástico y el íleon tiene una pared bastante gruesa con grasa adherida difícil de eliminar sin dañar la superficie. El yeyuno, que es la parte más larga del intestino, presenta las características más adecuadas para trabajar como membrana en la ósmosis inversa, por el diámetro que tiene, su flexibilidad, estructura y posibilidad de fácil limpieza.

6. Diseño y construcción del equipo de ósmosis inversa

El equipo debe considerar las características físicas de la membrana: cilíndrica y hueca. Por eso, los componentes básicos de una típica instalación de ósmosis inversa son un tubo para sostener la membrana, la estructura de soporte, la coraza, una entrada para la alimentación y dos salidas, el concentrado o rechazo y el permeado o producto; aunque normalmente se utiliza varios tubos, como en

un intercambiador de calor de coraza y tubos, para obtener una producción adecuada (Christie J. Geankoplis 1998).

El agua residual circula por el interior de los tubos que sirven de soporte a la membrana y el tubo exterior de mayor diámetro (coraza) que contiene agua pura recibe el agua permeada.

7. Ensayo de toxicidad aguda (Ecotoxicidad)

Este ensayo permite establecer la ecotoxicidad de las aguas sobre los cultivos. En el uso concreto del *Hordeum vulgare* (cebada), se evalúa el diámetro del vástago, su longitud radicular y elongación. El principio es que cuando la semilla de *Hordeum vulgare* se hidrata, produce una estimulación del crecimiento de las células y la elongación de la planta. Sin embargo, cuando la hidratación se lleva a cabo con sustancias tóxicas, la división celular de los meristemas radiculares puede inhibirse, ya sea retardando el proceso de mitosis o destruyendo las células. Las alteraciones impiden el crecimiento normal de la raíz y, por tanto, su elongación.

La cebada se usa básicamente como forraje en la zona de este estudio. Los comuneros también cultivan quinua, papa, cebolla, haba, alfalfa para su autoconsumo. Inicialmente el proyecto contemplaba realizar pruebas ecotoxicológicas con cebolla, quinua y lechuga. Se ha utilizado quinua en laboratorio, pero no se obtuvo resultados adecuados debido a que el tiempo del cultivo no fue suficiente para evaluar el efecto de las sustancias tóxicas sobre la quinua.

En esta propuesta se da prioridad a la cebada porque en la zona de influencia la crianza de ganado vacuno está dirigida sobre todo a la obtención de leche, pero como sus suelos están totalmente degradados (y por el costo y tiempo que tiene producir en esos terrenos), el cultivo hidropónico de cebada por aspersión es una alternativa.

7.1. Procedimiento experimental con la cebada

1. Material de investigación: semillas de *Hordeum vulgare*, pipetas de tres, cinco y diez milímetros, papel filtro, regla milimetrada, cajas petri, termómetro, cámara de germinación, agua destila-

da, agua de pila (agua potable), aguas tratadas y contaminadas de mina.

2. Trabajo en laboratorio: primeramente, desinfectar el material a utilizarse, posteriormente diluir el agua en concentraciones de 75%, 50% y 25%. El material de investigación será un blanco de agua (control positivo), agua tratada al 100%, dilución de agua al 75%, 50% y 25 %, respectivamente, en un total de veintisiete cajas.

Luego se procede así: se coloca en cada caja petri el papel filtro recortado al tamaño de la caja, guardando que cada papel quede bien plano en el fondo de la caja petri y a una distancia de cinco milímetros del borde de la caja petri. Con la ayuda de una pipeta se aplica las diferentes diluciones y posteriormente se distribuye homogéneamente cincuenta semillas de *Hordeum vulgare* en cada caja. Se tapa las cajas y se las lleva a una cámara de germinación, con temperatura constante y donde todas recibirán la misma iluminación. El material de investigación será observado durante dos semanas, aplicando las concentraciones arriba mencionadas en dosis de tres, cinco y diez milímetros.

En nuestro experimento, se aplicó durante tres días 3 ml de cada una de las concentraciones, luego durante dos días se aplicó 5 ml y el resto de los días se aplicó 10 ml de las diferentes concentraciones, para evaluar las siguientes variables de respuesta: desarrollo radicular, longitud del vástago, diámetro del vástago.

Al final del experimento se midieron esas variables y se confeccionó una tabla de comparación entre las medidas para verificar si existía diferencias significativas entre tratamientos y testigo (o blanco), utilizando un análisis de varianza (el ANOVA) para obtener un dato estadístico más válido de comparación de las diferentes soluciones.

7.2. Cultivo de cebada forrajera en invernaderos

Esta investigación se realizó en predios de la facultad de agronomía de la UTO, con una réplica en la comunidad de Sora Sora. En su desarrollo, se observó que en el balance de energía metabólica requerida (EM = energía requerida vs. energía consumida), el

máximo de nutrientes que el ganado vacuno necesita coincide con la época de escasez de forraje, lo que da lugar a un déficit importante de forraje para satisfacer el requerimiento. También es evidente que en la zona de estudio existe escasez de forraje debido a factores climáticos, fenómenos naturales y sobre todo a factores antrópicos (por influencia humana).

Para nuestro cultivo de forraje hidropónico su utilizó bandejas de plástico de 22 por 33 centímetros y un armazón de 150 por 1,50 metros para colocar las bandejas, concentraciones de aguas tratadas y no tratadas al 100%, semillas de cebada y plántulas de lechuga. Este trabajo se tuvo que repetir varias veces porque se buscó las condiciones más optimas para su desarrollo.

En el proceso inicial del experimento, se selecciona cebada de la variedad "Gloria" y se procede a desinfectarla durante tres minutos con una solución de hipoclorito de sodio (diez mililitros por litro de agua) para evitar el ataque de microorganismos patógenos (dejar más tiempo la semilla en esta solución podría perjudicar su viabilidad); finalmente se enjuaga las semillas con agua limpia.

Para la germinación, se coloca las semillas en una bolsa de tela y se las sumerge completamente en agua por un periodo no mayor a veinticuatro horas para poder lograr una completa inhibición. Ese tiempo comprende dos fases: después de doce horas de inmersión se debe airear la semilla durante una hora para que escurra el agua, posteriormente se debe colocar durante otras doce horas en una nueva agua y finalmente realizar un último oreado. Mediante este proceso se induce a la rápida germinación de la semilla por el estímulo que se da a su embrión. Esta pregerminación asegurará un crecimiento vigoroso del forraje verde hidropónico, ya que sobre las bandejas se usa semillas que ya han iniciado su brote; su desarrollo ya está estimulado pues al cambiar de agua cada doce horas se facilita la oxigenación.

Por cada metro cuadrado se siembra una dosis de dos a tres kilos de semilla; se las distribuye en una capa uniforme que no debe exceder los 1,5 cm de altura. Una vez realizada esta actividad se procede a poner una tela húmeda encima de la siembra pues mediante esta técnica se proporciona humedad y temperatura óptima

que favorecen la germinación y el desarrollo inicial. Una vez que ha brotado la semilla se descubre totalmente la bandeja.

Luego se procede a regar la siembra (el fondo de las bandejas estará perforado para evitar que las semillas se pudran).

El riego se realiza mediante microaspersoras de mano. El volumen de agua a usarse depende de las condiciones ambientales internas del vivero; el fondo de las bandejas estará perforado para evitar que las semillas se pudran.

7.3. Análisis estadístico-ecotoxicológico

Finalmente, para el análisis estadístico-ecotoxicológico se debe:

- Testear la hipótesis. Por ejemplo la evaluación de la calidad de agua en las diferentes concentraciones aplicadas mediante el método DL_{50}, basado en las especie cultivada de cebada, es diferente desde un punto de vista fisiológico y estadístico. Esa respuesta se debe principalmente a la morfología de cada especie, que responde a la aplicación de diferentes concentraciones de agua: agua de pila, agua tratada y agua sedimentada (su pH, salinidad, macro y micro nutrientes y elementos pesados son tóxicos para la planta).
- Validar las diferencias significativas en las mediciones. ¿Son diferentes los niveles de polución?, ¿son diferentes las respuestas a los contaminantes? Usar el análisis de varianza (ANOVA) mediante el paquete estadístico SAS, aplicando el diseño experimental completamente al azar con arreglo factorial de 3 por 4.
- Determinar las relaciones entre dos variables (análisis de correlación).
- Combinar datos de varias fuentes, por ejemplo diferentes valores de LD_{50}, para realizar los metaanálisis, con los que se confirman los principios/tendencias generales y por los que los umbrales pueden ser revisados.

Capítulo III

Aspectos biofísicos

1. Geología

Las formaciones geológicas en la zona del proyecto corresponden a dos eras: la primera se formó en el cenozoico, periodo cuaternario y fase andina II; la segunda en el paleozoico, periodo devónico-siluriano y fase cordillerana.

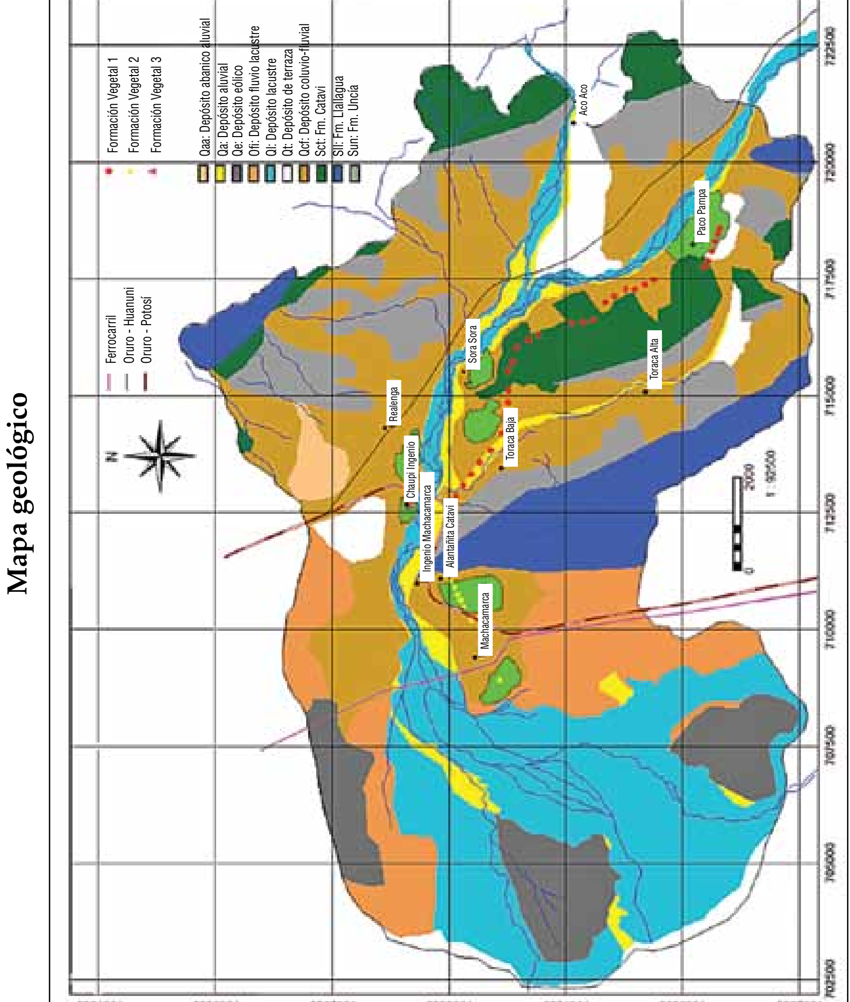
En el siguiente cuadro se presenta la superficie de las formaciones geológicas.

Cuadro 12
Superficie de las formaciones geológicas en la zona del proyecto

Código	Formación geológica	Descripción	Superficie (ha)	
			ha	%
Era cenozoica, periodo cuaternario, fase andina II				
Qaa	Depósito abanico aluvial	Arenas, limos, arcilla	159,30	0,90
Qa	Depósito aluvial	Arenas, limos	2.908,53	16,41
Qe	Depósito eólico	Arenas, limos	1.343,61	7,58
Qfl	Depósito fluvio-lacustre	Arenas, limos, sales	2.132,73	12,04
Ql	Depósito lacustre	Limos y afloramientos salinos	896,04	5,06
Qt	Depósito de terrazas	Cantos, gravas, arenas, limos y arcillas	643,41	3,63
Qcf	Depósito coluvio-fluvial	Gravas, arenas, limos y arcillas	4.739,94	26,75
Ca	Cuerpo de agua	Suelo inundado, cuerpo de agua	352,35	1,99
Era paleozoica, periodo devónico-siluriano y fase cordillerana				
Sct	Formación Catavi	Areniscas micáceas gris-verdosas intercaladas con lutitas	1.329,3	7,50
Sll	Formación Llallagua	Cuarcitas gris claras y marrones, areniscas, limonitas y lutitas gris verdosas	1.362,24	7,69
Sun	Formación Uncía	Lutitas grises a verdosas, niveles de areniscas y limonitas verde-olivo.	1.853,01	10,46
TOTAL			17.720,46	100

Fuente: Thuska Uma 2009

Mapa geológico



Fuente: Thuska Uma 2009

Se puede observar que la formación Qcf (depósito coluvio-fluvial) es la que mayor superficie abarca, con 4.739,94 hectáreas (26,75% del terreno); la formación Qa (depósito aluvial) tiene 2.908,53 hectáreas (16,41% del terreno); luego la formación Qfl (fluvio-lacustre) tiene 2.132,73 hectáreas (12,04% del terreno); luego están unidades pequeñas de depósitos eólicos, lacustres y terrazas que junto con las formaciones de Catavi, Llallagua y Uncía completan la geología de la zona del proyecto. Con referencia a las zonas agrícolas, en el mapa geológico se puede observar que prácticamente todas estas áreas se hallan sobre formaciones de depósitos coluvio-fluviales (Qcf), lo que da al suelo características especiales con presencia de gravas, arenas, limos y arcillas.

2. Elevaciones

El cuadro siguiente muestra la distribución porcentual de la superficie en diferentes niveles de elevación.

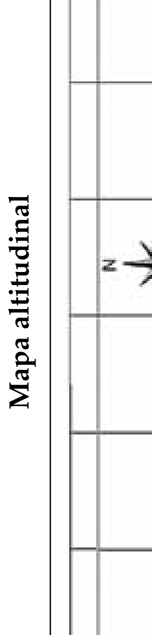
Cuadro 13
Distribución altitudinal de la superficie de la zona del proyecto

Elevación (metros sobre el nivel del mar)	Superficie	
	Ha	%
< 3750	8.341,38	47,07
3750 – 3800	3.379,41	19,07
3800 – 3900	4.316,31	24,36
3900 – 4100	1.341,72	7,57
4100 – 4300	279,54	1,58
> 4300	62,10	0,35
TOTAL:	17.720,46	100,00

Fuente: Thuska Uma 2009

En el mapa altitudinal se puede observar que aproximadamente el 50% de las superficies agrícolas de la comunidad de Paco Pampa se encuentra en la cota por encima de los 3.800 metros sobre el nivel del mar, mientras que las áreas agrícolas de las comunidades de Sora Sora, Toraca Baja y parte la comunidad de Chaupi Ingenio se sitúan entre los 3.750 y los 3.800 metros sobre el nivel del mar; las áreas agrícolas de las comunidades de Alantañita Caravi, Machacamarca y parte de la comunidad de Chaupi Ingenio están por debajo de los 3.750 metros sobre el nivel del mar.

Mapa altitudinal



Fuente: Thuska Uma 2009

Debido a que casi la totalidad de las parcelas agrícolas está por debajo de la cota 3.800, se recomienda que las instalaciones de las plantas de tratamiento de aguas se ubiquen por encima de esa cota, lo cual sería factible para el aprovechamiento de las parcelas agrícolas mediante el riego por gravedad.

3. Pendiente

Debido a que la zona del proyecto presenta una topografía accidentada, se vio la necesidad de agrupar cada una de las unidades de pendiente en siete categorías (PROMIC 2004 y CLAS 2005). En el cuadro siguiente se describe cada una de las categorías de pendiente así como la superficie ocupada en la zona del proyecto.

Cuadro 14
Unidades de pendiente en la zona del proyecto

Unidad	Grado de pendiente	Descripción	Superficie	
			ha	%
1	< 3%	Superficies casi planas. En la zona del proyecto, se encuentran ocupadas por los lechos de los ríos y los valles bajos. Por su inclinación presentan muy bajo riesgo de erosión.	11.670,93	65,86
2	3% - 8%	Superficies presentes en zonas de ladera. En la zona del proyecto se encuentran alrededor de los lechos de río. Presentan un bajo riesgo de erosión.	2.188,26	12,35
3	8% - 16%	Superficies de laderas moderadamente empinadas. En la zona del proyecto se encuentran distribuidas en la misma dirección de los cauces. Presentan un moderado riesgo de erosión.	1.531,71	8,64
4	16% - 25%	Superficies de laderas empinadas. En la zona del proyecto están por encima de las laderas moderadamente empinadas, también se distribuyen a lo largo de los lechos de río. Presentan un alto riesgo de erosión.	1.005,39	5,67
5	25% - 38%	Superficies de laderas muy empinadas. En la zona del proyecto estas unidades están distribuidas en las partes medias y altas. Presentan un alto riesgo de erosión.	875,16	4,94
6	38% - 55%	Superficies de laderas escarpadas. En la zona del proyecto se hallan en las partes medias y altas. Presentan un riesgo de erosión muy alto.	373,77	2,11
7	> 55%	Superficies de laderas muy escarpadas. En la zona del proyecto se hallan en las partes altas. Presentan un riesgo de erosión muy alto.	75,24	0,42
TOTAL			17.720,46	100,00

Fuente: Thuska Uma 2009

Mapa de pendientes



Fuente: Thuska Uma 2009

La mayor superficie (11.670,93 hectáreas) está ocupada por un área con pendiente menor al 3% (65,86% del terreno) en tanto que sólo un 0,42% (75,24 hectáreas) está situado en zonas de pendiente muy escarpada mayor a 55%. En el mapa de pendientes se puede observar que las parcelas agrícolas de las comunidades de Paco Pampa, Sora Sora, Toraca Baja, Chaupi Ingenio y Machacamarca están situadas en suelos cuyas pendientes no exceden el 3%, lo cual evita procesos de erosión y procesos de percolación o arrastre de sedimentos en superficie. También se puede observar que el 50% de las parcelas agrícolas de la comunidad de Alantañita Caravi está situado en suelos con pendiente de 3 a 8%, detalle que debe ser debidamente estudiado y considerado en los proyectos para implementación de riego por superficie.

4. Cobertura vegetal

Sobre las terrazas antiguas, en el valle del río Huanuni y Veintaimedia, se ha identificado mayor densidad de vegetación herbazal (*chillca*, paja brava y resto de cultivos anuales) con asociación de arbustal ralo (*thola Calamagrostis*). En el pie de monte (laderas), la vegetación predominante corresponde a una asociación herbazal-arbustal (pasto bandera, paja brava, *thola - Baccharis*) con restos de cultivos anuales y suelos moderadamente profundos a profundos en pendientes de 0 a 10% (planos a casi planos y ligeramente inclinados). En el fondo del valle (terrazas recientes), la vegetación predominante es una asociación herbazal densa con arbustal ralo (*thola - Baccharis*, pasto bandera, garvancillo - *Vicias* y *kainlla*) y parcelas con restos de cultivos de cebada, quinua y otros. En el cuadro que sigue se describe las superficies ocupadas por cada una de las unidades de cobertura vegetal identificadas según el Índice de Vegetación Normalizado (NDVI). En la distribución de las unidades en la zona del proyecto, se aprecia que la mayor cobertura vegetal se sitúa sobre las zonas agrícolas y valles, que son fuente de almacenamiento de humedad en el suelo y producen un mayor desarrollo de la vegetación.

Cuadro 15
Superficies y descripción de la cobertura vegetal

Cubierta vegetal	Descripción	Superficie	
		ha	%
< 25 %	Superficie del lecho del río y las laderas y colinas con cobertura herbazal y arbustal rala, casi desnuda. Debido a su baja cobertura vegetal presenta un alto riego de erosión.	16.785,09	94,72
25% a 50%	Partes bajas y medias de la zona del proyecto, sobre los bordes de las parcelas agrícolas y orillas del río Huanuni, especies como pasto bandera, paja brava y otras gramíneas de porte bajo son identificadas en esta unidad. Tiene un moderado riesgo de erosión.	529,02	2,99
50% a 75%	Vegetación del tipo *tholar (Baccharis)*, pajonal denso principalmente de paja brava *(Stipa)*. Situada en la parte media de la zona de estudio, sobre formaciones de laderas con alto grado de disecciones. Presenta moderado riesgo de erosión.	170,37	0,96
> 75%	Área con alta cubierta vegetal. Se encuentra en zonas agrícolas y laderas situadas en el valle de las poblaciones de Toraca, Chaupi Ingenio, Paco Pampa, y Sora Sora principalmente. Presenta un bajo riesgo de erosión.	235,98	1,33
TOTAL		17.720,46	100,00

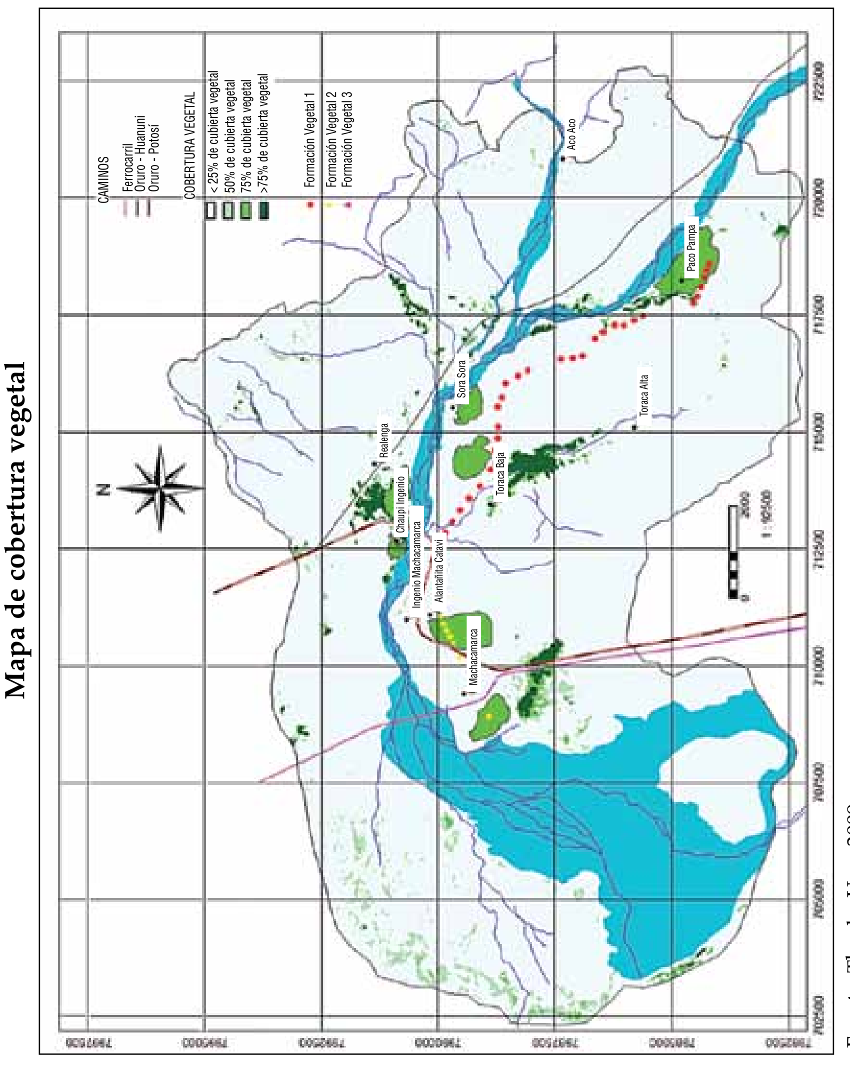
Fuente: Thuska Uma 2009

En el mapa de cobertura vegetal se muestra la distribución espacial de las especies vegetales. En el mapa de los puntos cuadrantes se muestra la ubicación de los sitios donde se evaluó la vegetación en el área del proyecto por el método de cuadrantes y se observa la cobertura vegetal identificada en cada una de estas zonas.

En la imagen satelital se puede apreciar la distribución espacial de las áreas agrícolas de la zona. También se observa su disponibilidad (en Alantañita Caravi, Chaupi Ingenio, Toraca Baja) que puede ser favorablemente aprovechada para agricultura con el riego de aguas de mina tratadas mediante métodos pasivos y activos que se propone en este libro.

De la misma manera en la vista tridimensional de la imagen satelital se aprecia cada detalle.

Mapa de cobertura vegetal



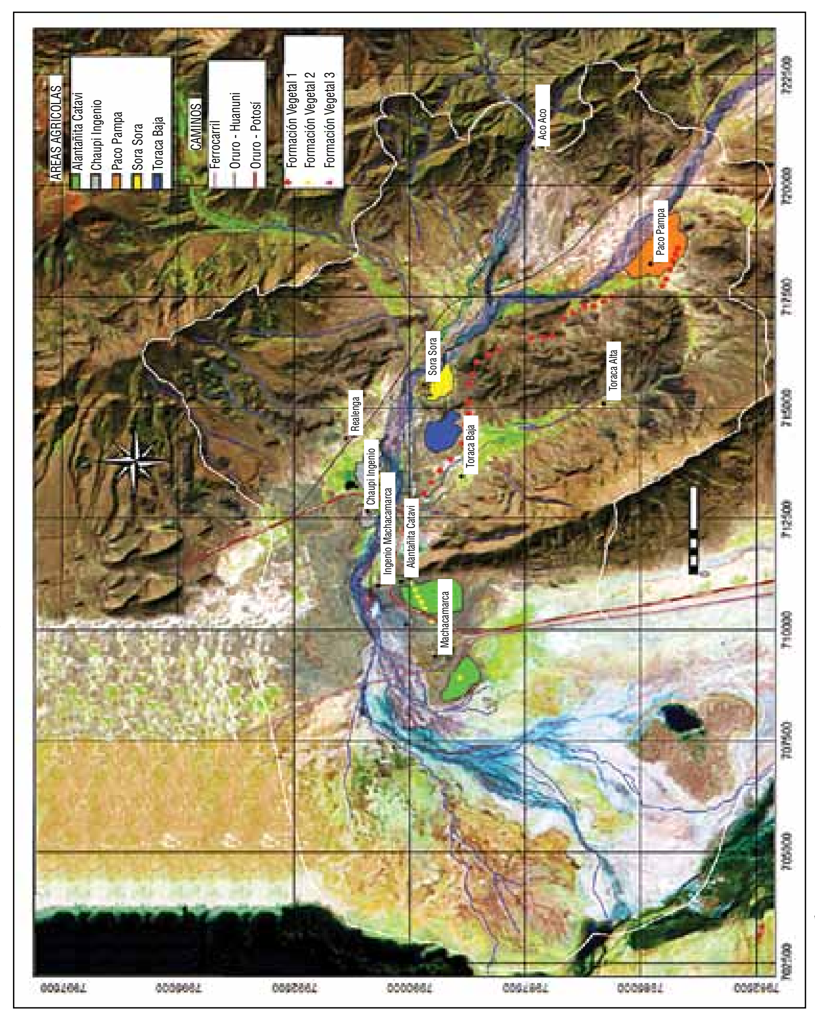
Fuente: Thuska Uma 2009

Mapa de puntos cuadrantes



Fuente: Thuska Uma 2009

Imagen Satélite Landsat - 5



Fuente: Thuska Uma 2009

Imagen 3
Vista tridimensional del área de influencia del proyecto

Fuente: Thuska Uma 2009

Capítulo IV

Diagnóstico socioeconómico

1. Las comunidades afectadas

En el área de influencia del proyecto hay once comunidades campesinas, desde la comunidad de Realenga, río San Juan de Sora Sora, hasta la comunidad de Alantañita Caravi, en las cercanías del lago Poopó.

Cuadro 16
Contaminación en las comunidades de Machacamarca

Influencia de la contaminación	Comunidad
Influencia directa	Ingenio de Machacamarca
Influencia indirecta	Sora Sora
	Sora
	Realenga Cruce V.
	Realenga J. Urqu
	Chaupi Ingenio
	Toraca Baja
	Toraca Alta
	Paco Pampa
	Machacamarca
	Alantañita Caravi

Fuente: Thuska Uma 2009

Como evidencia el cuadro, hay dos zonas donde influye la contaminación minera: una zona de influencia directa y varias de influencia indirecta.

2. La comunidad de influencia directa

El ingenio de Machacamarca, la zona de influencia directa, tiene 469 habitantes. Se dice que hasta antes de la llegada del tren, el transporte de mineral al lugar se hacía en cuatro días y a lomo de bestia; con la llegada del ferrocarril (cuyo tendido se hizo entre 1914 a 1921) esa distancia se llegó a cubrir en cuatro horas.

Ernesto Choqueticlla, poblador del lugar comentó en una entrevista: "mi abuelo nos contaba, que antes este pueblo era estación ferroviaria. Aquí venían a esperar al tren los comunarios desde varios pueblos de los alrededores. Después poco a poco ha venido a vivir mucha gente. Eso dicen. Han llegado comerciante desde Oruro, aquí vivían; y después desde Tupiza y desde más allá. Así se ha formado el pueblo. Ahora es grande."

La dinámica de esta localidad ha estado, pues, íntimamente ligada al procesamiento del mineral y a las actividades comerciales que de ello emanan. Consiguientemente, la urbanización de Machacamarca se dio de manera rápida y propició el establecimiento de comerciantes provenientes de todas partes. La frondosa arboleda que es característica del poblado podría haberse originado en una iniciativa de los empleados alemanes, estadounidenses e ingleses del industrial Simón Patiño, quienes –se dice– comenzaron a plantar árboles en el campamento ferroviario. Con el tiempo, se generalizó la plantación de arbolitos en toda la comunidad; y hoy se observa sauces, álamos, cipreses y pinos brindando su follaje a un pueblito plantado en medio del altiplano andino.

3. Comunidades con influencia indirecta

El cuadro siguiente muestra el detalle de habitantes por sexo en las comunidades de influencia indirecta de la contaminación, diez en total donde viven más de mil personas, que podrían, a medida que pase el tiempo, llegar a convertirse en áreas de influencia directa.

Cuadro 17
Comunidades con influencia indirecta

Nivel de influencia	Comunidad	Varón	Mujer	TOTAL
Influencia indirecta	Sora Sora	39	49	88
	Sora	92	134	226
	Realenga Cruce V.	74	76	150
	Realenga J. Urqu	74	93	167
	Chaupi Ingenio	54	82	136
	Toraca Baja	31	42	73
	Toraca Alta	28	26	54
	Paco Pampa	34	40	74
	Machacamarca	1.408	1.517	2.645
	Alantañita Caravi	44	45	89

Fuente: Thuska Uma 2009

3.1. Población

Ya se ha dicho que la comunidad con mayor población es el municipio de Machacamarca. Allí, sus pobladores trabajan en el ingenio y o bien se dedican a la agricultura; otros, pero en muy poca cantidad, se dedican al comercio informal. Las comunidades con menor población son las de Toraca Alta y Baja, donde se desarrolla una actividad netamente agrícola: en estas dos comunidades se realiza la transformación de derivados lácteos y tiene muy pocas personas trabajando en la minería.

Las encuestas realizadas en toda la zona de influencia explican que la gran mayoría de las personas vive en zonas urbanas, como ocurre con el municipio de Machacamarca y otras comunidades, por la facilidad de contar con agua.

3.2. Organización comunal

En virtud de la Ley de Participación Popular (1994) y la Ley de Descentralización Administrativa (1995), todas las comunidades y municipios de Bolivia manejan de manera descentralizada sus presupuestos; para poder aplicar las políticas de participación social, las leyes arriba citadas crearon las llamadas organizaciones territoriales de base (OTB), mediante las cuales la llamada "sociedad civil"

participa en las decisiones municipales. En la zona de influencia de este proyecto se logró identificar diferentes tipos de organizaciones sociales y comunales que de cierto modo podrían considerarse OTBs, como se observa en el cuadro siguiente.

Cuadro 18
Organización de las comunidades

Nivel de influencia	Comunidad	Tipo de organización	Organización
Influencia directa	Ingenio de Machacamarca	OTB	Sindical
Influencia indirecta	Sora Sora	Comunidad, OTB	Originaria, sindical
	Sora	Comunidad	Sindical
	Realenga Cruce V.	Comunidad, OTB	Originaria, sindical
	Realenga	Comunidad	Sindical
	Chaupi Ingenio	Comunidad	Sindical
	Toraca Baja	Comunidad, OTB	Originaria, sindical
	Toraca Alta	Comunidad, OTB	Originaria, sindical
	Paco Pampa	Comunidad	Sindical
	Machacamarca	Municipio, OTB	Originaria, sindical
	Alantañita Caravi	Comunidad	Originaria, sindical

Fuente: Thuska Uma 2009

Hay diferentes OTBs organizadas por cada comunidad, que en su caso se llaman solamente comunidad, como ocurre con Paco Pampa, Alantañita Caravi, Realenga, Chaupi Ingenio y Sora; la organización comunal es distinta o similar en algunos casos, por ejemplo en Paco Pampa la organización comunal es sindical y en Machacamarca es originario-sindical.

3.3. Actividad económica

El sector dedicado a la agropecuaria se encuentra en la comunidad de Realenga, donde se cultiva papa, haba, cebada, quinua y otros productos. En la ganadería sobresale la crianza de vacunos. También en el sector de Alantañita Caravi las actividades son predominantemente agrícolas y ganaderas, se cultiva cebolla orgánica y otros productos como haba, papa, quinua, y también se ve la crianza de ovejas y vacas.

El siguiente cuadro muestra las actividades económicas predominantes en todas las comunidades de la zona.

Cuadro 19
Actividad económica en las comunidades de influencia

Comunidad	Actividad económica principal
Sora Sora	Agropecuaria
Sora	Agropecuaria
Realenga Cruce V.	Agropecuaria
Realenga	Agropecuaria
Chaupi Ingenio	Minera
Paco Pampa	Agropecuaria
Toraca Baja	Agropecuaria
Toraca Alta	Agropecuaria
Machacamarca	Mixta
Ingenio de Machacamarca	Minera
Alantañita Caravi	Mixta

Fuente: Thuska Uma 2009

Si bien en el cuadro aparece que la mayoría de las comunidades se dedica a la agropecuaria, en realidad la mayoría de la población se dedica a la actividad minera, que se constituye en una importante fuente de ingresos para las familias, dada la coyuntura de altos precios de los minerales a en el mercado mundial. El cuadro anterior muestra además la "vocación productiva" o actividad económica principal de las once localidades, una información corroborada por las encuestas.



Encuesta a los comunarios.

En el municipio de Machacamarca, el centro más poblado, las familias perciben ingresos económicos por la producción agropecuaria, luego de otras actividades como la minería y el comercio; el turismo es una actividad relativamente nueva que también está generando ingresos.

3.4. Vivienda

Por las encuestas realizadas a los pobladores, se extrajo que hay cinco formas de habitar la vivienda: propia, en alquiler, en anticrético, de favor, otra. En el gráfico siguiente se revela esas formas en las once poblaciones.

Gráfico 3
Formas de ocupar la vivienda por localidad

Fuente: Thuska Uma 2009

3.5. Educación

Respecto del grado de instrucción de padres y madres de familia, el gráfico 4 revela que el 7% y el 9% de las madres y de los padres, respectivamente, cursaron solamente el nivel inicial, el 40% y el 42% cursaron la primaria; el 36% y 39% cursaron secundaria (madres y

padres); el 12% y el 6% cursaron el nivel técnico y el 1% en ambos casos cuenta con estudios superiores (licenciatura) en diversas áreas. El 3% y 2%, respectivamente, no tiene grado alguno de instrucción.

Gráfico 4
Grado de instrucción de madres y padres de familia

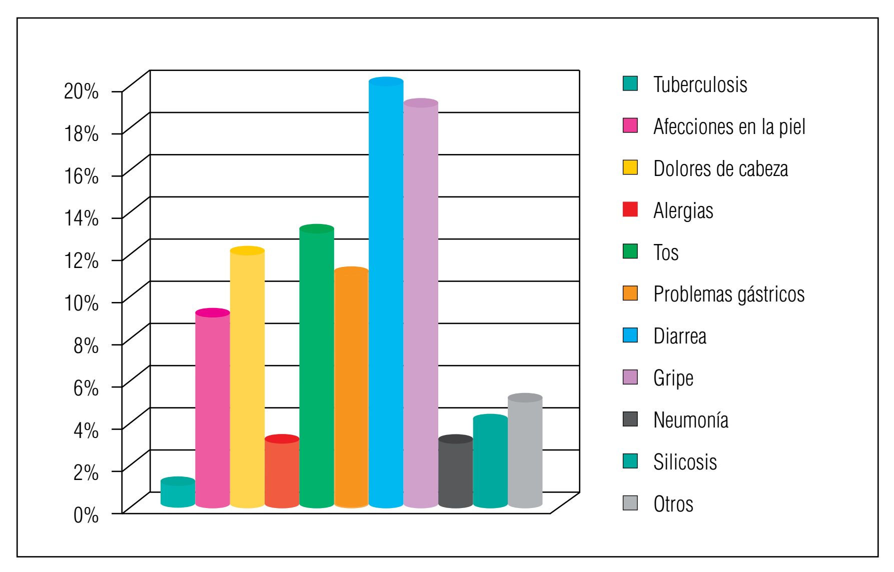
Fuente: Thuska Uma 2009

Por último, en la clasificación de "otro", se menciona instrucción de profesores (pero sin estudios académicos) y se incluye la opción "no sabe/no responde".

3.6. Salud

Entre las enfermedades más frecuentes que afectan a los pobladores, la tos y gripe suman aproximadamente un 32% (aunque dicha información podría estar sesgada debido a la época primaveral en que se realizó la encuesta). Entre otras afecciones de importancia para los pobladores se mencionó diarreas (20%), dolores de cabeza (12%), tuberculosis, alergias y neumonía con un 7%, problemas gástricos (11%), afecciones a la piel (9%); el 5% de las respuestas clasificadas en "otros" mencionaron enfermedades como el cólera e infecciones de transmisión sexual, entre otras. La información se obtuvo sobre la base de preguntas de percepción, por lo que estos datos constituyen simplemente una referencia.

Gráfico 5
Enfermedades más frecuentes en la zona de influencia



Fuente: Thuska Uma 2009

La encuesta también incluyó una pregunta respecto de la mortalidad en adultos, que muestra que de 62 personas adultas fallecidas, 43% murieron por vejez, 36% por enfermedad y 21% por accidente.

En el gráfico precedente destacan las enfermedades respiratorias (28%), las cuales en un buen porcentaje incluyen silicosis (mal de mina), neumonía, pulmonía y tuberculosis. Los encuestados también mencionaron como enfermedades el *lari lari* y el mal del *k´ari k´ari* (lo primero se refiere a que el alma o *ajayu* de los niños es robada, lo segundo al robo de grasa corporal en la que se encuentra la vitalidad de las personas, ambos males tienen consecuencias mortales según la creencia de la gente).

3.7. Percepción ambiental de los comunarios

El río nace en el territorio que ocupa la *marka* [unidad territorial y política aymara] Bombo. Pero en las laderas de Wila Apachita y hasta la comunidad de Pata Wanuni no existe mayor contaminación, como en abril de 2009 refiere un comunario de Realenga, Remigio Condori:

> El agua del río desde el pueblo de Bombo y más atrás es nomás limpia. Ahí cerquita del río toman el agua los animales; con esa misma agua regamos lo que poquito nos plantamos, arriba, por el pueblito de Panti Pata, allá en Huanuni, ahí arriba nomás. No hay problema con el agua, porque limpio nomás está; pero cuando el agua pasa por la empresa [la Empresa Minera Huanuni] el agua negro se vuelve y hediondo es, y eso ya no sirve cuando llega hasta aquí, en Realenga, peor en más abajo, se lo está comiendo los terrenos y los ganados ya no toman y se están muriendo nomás.

Entre las comunidades más afectadas por el agua contaminada tenemos: Aco Aco (Florida-Pairumani), Paco Pampa, Sora, Cebada Mayu, Toraca Alta, Toraca Baja, Tres Pozos, Carbuyo, Chaupi Ingenio, Alantañita Caravi y Machacamarca. El efecto de las aguas contaminadas se muestra en todo el curso del río, lo que es claramente perceptible en la arena de copajira y el alto contenido de sólidos disueltos que arrastra ocasionando la paulatina muerte de la flora ribereña y la generación de aguas insalubres para la ganadería. Omar Mamani, comunario de Sora Sora, dice:

> En mi comunidad solamente hemos quedado los viejos como yo porque ya no hay nada que cosechar ni qué comer; hasta el agua no sirve, los animales ni eso toman, las aguas de las lluvias que cae sólo esito nos recolectamos en bateas, en bidones, en lo que se puede recolectamos; y de eso tenemos que dar a nuestros animales para que no se mueran, una pena están sufriendo. Y nosotros por cariño a nuestra tierra, porque aquí hemos nacido y para que no nos quiten estamos aquí. Así, estamos viendo, ni agua ya tenemos, para nada siempre sirve, ni para lavar la ropa, sucio nomás saca. El "ace" (detergente) ni espuma hace, harto tenemos que echar, todo siempre está mal. A ver, ahora estamos viendo todo basura, basura siempre es. Para nada sirve esta agua, porque trae diarrea nomás a nuestros animales, y todavía es peor: ya no se puede vivir.

En la jurisdicción territorial del municipio de Machacamarca, las comunidades afectadas por las aguas contaminadas del río son muchas más en la parte de sus subcuencas, pues reciben la confluencia de otros ríos secundarios, mayormente de curso temporal durante la época de lluvias: río Katari K'awa, río Pata Uma, Qalajawira, río Aco Aco, río Pairumani y otros de menor importancia, como también vertientes.

A partir del río Pairumani y de Paco Pampa, la cuenca toma el nombre de Sora Sora, debido a que más abajo pasa por la orilla de la legendaria marka aymara de Sora Sora, por Realenga y Alantañita Caravi, y luego desemboca en los lagos Uru Uru y Poopó. La comunidad de Alantañita Caravi es el sector que sufre mayores consecuencias, tanto por las aguas contaminadas como por el arrastre de mineral, acompañado de aguas de copajira, como señala el comunario Juan José Cuisa:

> Alantañita Caravi es la comunidad que sufre más con la contaminación del río y del lago, de todo lado está entrando la contaminación, ya no sabemos que más vamos a hacer. Las personas que viven en las comunidades de arriba no sufren como nosotros, porque por ahí pasa el agua limpia nomás. Pero aquí, el agua nos trae toda la contaminación, la copajira desde Huanuni, y eso se junta, cada año más está. En algunos lugares casi ya han desaparecido las pajas, están bien tapadas con el mineral, aparte lo está matando las plantas que tenemos. La basura que baja desde arriba se queda aquí y eso no le deja crecer y se muere. ºYa no es como antes! Todo está empeorando. En mi terreno ya no hay siempre qué van a comer los animales, porque se han ido al otro lado o sino se han muerto, yo no sé qué puedo hacer. Algunas familias ya no sabemos de qué vamos a vivir.

También la flora y la fauna están desapareciendo en la zona del ingenio de Machacamarca, como señala Óscar Mita, poblador del lugar:

> Cuando yo era niño aquí se sembraba de todo, mi papá tenía habas, arvejas, hasta choclos me acuerdo teníamos. Pucha…, con mi mamá sabíamos ir a los árboles a sacar guindas, manzanas y otras frutas que teníamos en la casa de gerencia, biencito era antes. Ahora, con la llegada de la minería de joven todo se ha arruinado, nada siempre no hay. Antes, hasta peces teníamos en el río, sabíamos ir a cazar a pie lejos, algunas veces llegábamos caminando hasta el lago para traer pescado y luego mi mamá sabía ir a vender a los vecinos, y cuando era harto hasta Oruro llevaba; ahora ya ni para comer no alcanza. Y todo esto tienen la culpa los mineros. Ni modo, así nomás me voy a tener que morir.

Sora Sora ha sufrido, por una parte, la contaminación de las aguas del río, que ha ocasionado enormes perjuicios a la actividad

agrícola, y por otra parte, la pérdida de habitantes en el pueblo, pues han sido absorbidos por el naciente pueblo de Machacamarca y la emigración permanente hacia las ciudades más cercanas y en un alto porcentaje hacia Chile, Argentina, España. Cuenta Óscar Villca, poblador de Sora Sora:

> Cuando mis abuelos vivían y mis papás eran jóvenes, Sora Sora era pues el pueblo más importante. En ese tiempo todo estaba completo. Había cargos que eran cumplidos completamente. Nuestros *awichus* [abuelos] tenían cultivos de habas, eso producía mucho, y era regado con las aguas de río nomás. El pueblo tenía sus ayllus, y había *jilaqatas* [autoridades originarias]. Ahora todo eso se ha perdido. Los *tata jilaqatas* ya no hacen sus costumbres en el pueblo, tampoco se reúnen. Se han ido a otros pueblos. Las costumbres también se han perdido, porque antes, antes siempre, había *wilancha* [ceremonia de sacrificio de animales a las deidades] en la fiesta de comadres, antesitos de carnavales. Ahora eso también se ha perdido, tal vez porque hartas personas se han vuelto "hermanos" [cristianos evangélicos], algunos católicos seguimos habiendo, nosotros somos pocos pero seguimos con nuestras costumbres.

4. La situación de los trabajadores del ingenio

Cuadro 20
Planta laboral del ingenio de Machacamarca

Datos	Resultados
Total de personal	202 personas
hombres	148
mujeres	54
Turnos de trabajo	Tres, de 8 h c/u.
mañana	6.00 a 14.00
tarde	14 a 22.00
noche	22.00 a 6.00

Fuente: Thuska Uma 2009

El ingenio de Machacamarca, como se observa en el gráfico 6, se nutre de trabajadores que provienen de diversos lugares. En la época de la colonia, gran parte de los trabajadores pertenecía a Sora Sora. Ya en la república, y sobre todo después de la relocalización de 1985, la población de trabajadores varía de acuerdo a su zona de residencia.

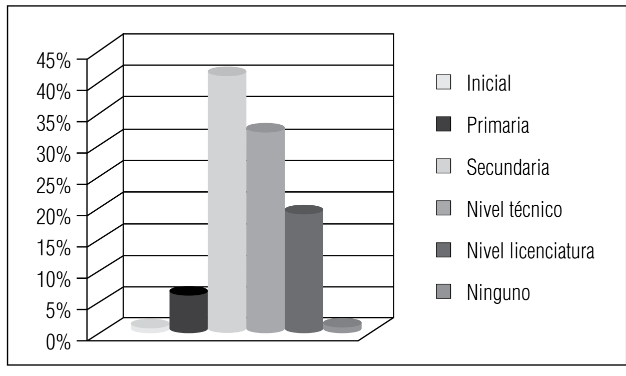
Gráfico 6
Residencia de los trabajadores del ingenio de Machacamarca

Fuente: Thuska Uma 2009

Como se puede observar, una gran mayoría vive en Huanuni (32%) y 31% vive en la ciudad de Oruro. El resto de los trabajadores vive en la población de Machacamarca y en poblaciones aledañas al ingenio.

En cuanto a su instrucción, un 42% de los trabajadores del ingenio de Machacamarca cursó la hasta la secundaria, un 32% obtuvo un nivel de técnico, un 19% cursó la universidad o institutos de educación superior y un 1% no obtuvo grado alguno de instrucción, como se muestra en el siguiente gráfico.

Gráfico 7
Grado de educación de los trabajadores del ingenio de Machacamarca



Fuente: Thuska Uma 2009

La remuneración económica de los trabajadores del ingenio es muy variable. Se les cancela de acuerdo al trabajo realizado. Los eventuales reciben desde ochocientos hasta dos mil bolivianos; los trabajadores de planta ganan de acuerdo a las *mitas* [turnos] trabajadas o las horas de trabajo que realizan, donde se suma sobretiempos y bonos, todo eso fluctúa en sumas que van de tres mil a cinco mil bolivianos, dependiendo de la antigüedad de los trabajadores. Los técnicos de planta con grado de instrucción superior (ingenieros) reciben salarios por ocho horas de trabajo estipuladas por ley; los salarios varían según la antigüedad y el trabajo desempeñado entre 3500 hasta 6500 bolivianos. No se les paga sobretiempos, pero sí reciben bonos.

5. Los cooperativistas relaveros

Los relaveros o rescatistas de mineral se encuentran organizados de la siguiente manera:

Cuadro 21
Cooperativas relaveras en Machacamarca

Cooperativas	Número de cooperativistas
Puente Grande	42
Unificada	84
Machacamarca Limitada	137

Fuente: Thuska Uma 2009

Como se puede apreciar, la cooperativa con mayor cantidad de socios es Machacamarca Limitada, seguida por las cooperativas Unificada y Puente Grande.

Los rescatistas de mineral, también llamados relaveros, se ubican en zonas aledañas al ingenio de Machacamarca y trabajan con las aguas vertidas por el ingenio. En esta labor no tienen horarios, y hasta trabaja toda la familia, incluyendo las esposas y los hijos mayores. El material se extrae mediante equipos y materiales artesanales. Como ya se dijo, la materia prima son las aguas vertidas por el ingenio, el material principal que se extrae mediante un proceso gravimétrico artesanal es el estaño. Para este proceso, los cooperativistas usan químicos como el santato y otros.

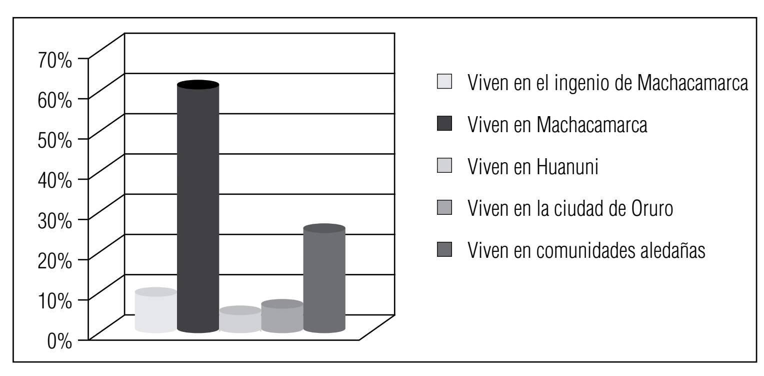
Es una labor sumamente esforzada, por el tiempo y la fuerza humana que se requiere, pero sólo así las familias del lugar garantizan su subsistencia. En cuarenta a cuarenta y cinco día de trabajo extraen entre dos a tres sacos de mineral (aproximadamente 96 kilogramos) que venden en las empresas mineras y fundidoras privadas de la ciudad de Oruro; el precio de venta es muy relativo, las cooperativas a las cuales están afiliados los trabajadores son las que ayudan a comercializar el producto.



Entrevista a un relavero.

Los relaveros provienen de diversos lugares, como se observa en el gráfico.

Gráfico 8
Residencia de los relaveros de Machacamarca



Fuente: Thuska Uma 2009

De acuerdo al gráfico 8 podemos señalar que el 60% de los rescatistas de mineral vive en Machacamarca, un 24% en comunidades aledañas, y el resto en el ingenio de Machacamarca, en la población de Huanuni y en la ciudad de Oruro.

En el gráfico 9 se observa el grado de instrucción de los rescatistas o relaveros de mineral: el 44% cursó primaria, un 32% cursó secundaria, el 6% inicial y técnico medio, un 1% cursó el nivel licenciatura y un 11% no tuvo educación.

Gráfico 9
Educación de los relaveros de Machacamarca

Fuente: Thuska Uma 2009

Las ganancias de los relaveros se calculan por la productividad media de trabajador por día. En las tres cooperativas, estas ganancias[5] llegan apenas a dos dólares por persona al día. Un cooperativista obtiene por el mineral, en el mejor de los casos, un ingreso mensual de mil bolivianos (pues el precio de los minerales está bajando), aunque todo el grupo familiar llega a percibir 2200 bolivianos o más.

Para conocer el estado de salud general de los relaveros, en las encuestas[6] se les pidió mencionar las enfermedades más frecuentes

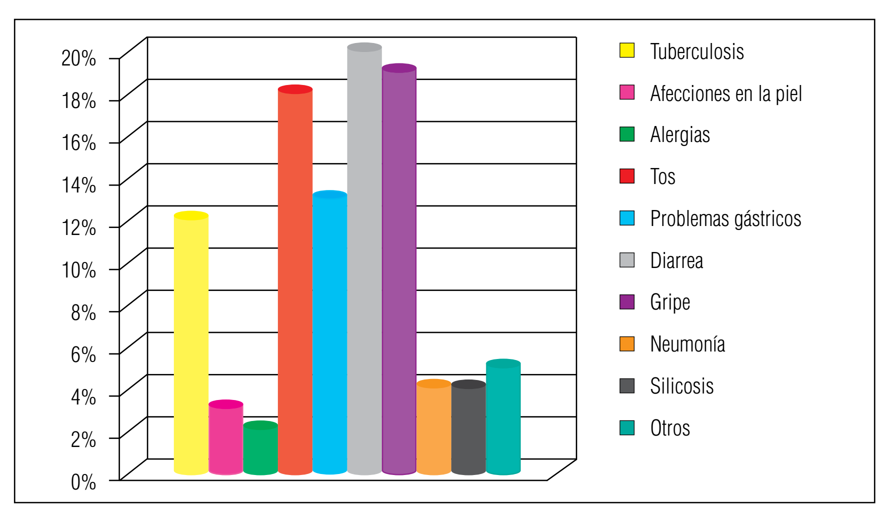
---

5 Las cifras corresponden a declaraciones hechas por los encuestados.

6 La encuesta rescata información sobre la base de preguntas de percepción, las respuestas pueden implicar desconocimiento del encuestado sobre las enfermedades, por lo que estos datos constituyen simplemente una referencia.

que les afectan. En el gráfico 10 se muestra que la tos y gripe suman un 37% (aunque dicha información podría variar para otras épocas del año, pues la encuesta se realizó en primavera); otras afecciones de importancia son diarreas, dolores de cabeza, tuberculosis, alergias, neumonía, problemas gástricos, afecciones en la piel. En otras enfermedades se mencionó cólera e infecciones de transmisión sexual.

Gráfico 10
Salud de los relaveros



Fuente: Thuska Uma 2009

Capítulo V

Diagnóstico ambiental

1. Efectos de la contaminación en la flora y la fauna

El principal problema para el uso adecuado de los recursos naturales en la zona de este estudio es la permanente contaminación minera y antrópica del río San Juan de Sora Sora, que afecta negativamente a la flora y fauna. La vegetación del lugar no sólo sufre daños severos por la contaminación minera sino que también se producen anomalías climáticas como heladas, sequías y erosión eólica e hídrica.

Diferentes instituciones ambientalistas han declarado a la zona de nuestro estudio como zona de desastre ambiental. Se asume que las especies nativas del lugar *sobreviven* en suelos contaminados, y por ello se podría decir que estas especies han desarrollado mecanismos fisiológicos especiales para tolerar la presencia de metales pesados en el suelo, evitando la entrada de los metales a la raíz y a la parte aérea de la planta mediante su inmovilización en las vacuolas.

Preservar las especies silvestres de la zona debe ser una prioridad no sólo para evitar la pérdida de esa rica biodiversidad sino por la posibilidad de utilizarlas en fitotecnologias ambientales de revegetación, fitoestabilización y fitoextraccción de especies contaminadas.

1.1. La flora silvestre

En el área de este estudio se ha encontrado tres tipos de formaciones vegetales:

- *La formación vegetal 1* comprende las comunidades de Paco Pampa, Toraca Alta y Toraca Baja.

– *La formación vegetal 2* comprende la comunidad de Alantañita Caravi.

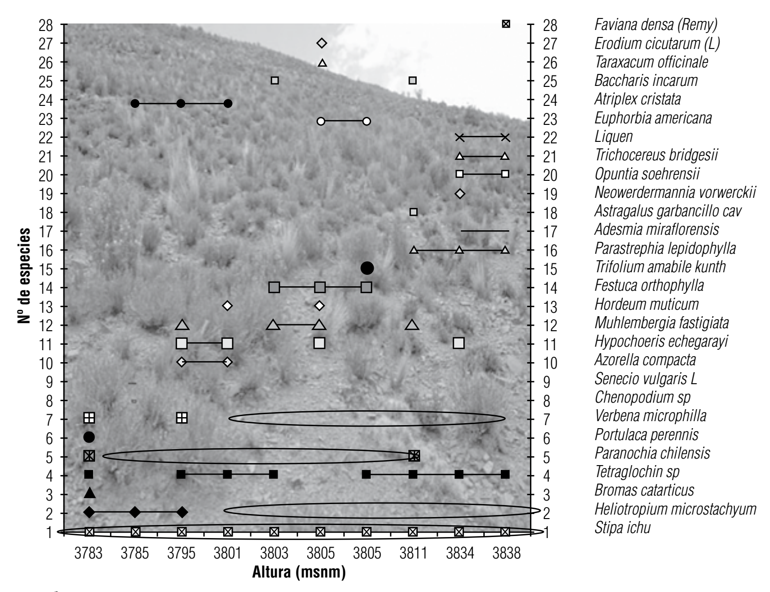
– *La formación vegetal 3* comprende la comunidad de Chaupi Ingenio.

Para inventariar la flora silvestre en estas formaciones vegetales se usó la metodología del transecto variable propuesto por Foster *et al.* (1995) y los cuadrantes del método propuesto por Braun Blanquet, (1979). El transecto es un método de evaluación de especies vegetales con recorridos prolongados a lo largo de una ladera, planicie y serranía; en cambio la metodología del cuadrante permite evaluar con más detalle zonas específicas, es decir áreas reducidas.

1.1.1. Formación vegetal 1

Río arriba, según se visita el campo de Machacamarca, se encuentra mayor diversidad florística, debido a que en esta zona la contaminación minera no ha afectado en gran magnitud a las especies nativas.

Figura 8
Presencia de especies vegetales en la formación vegetal 1 (transecto 1)

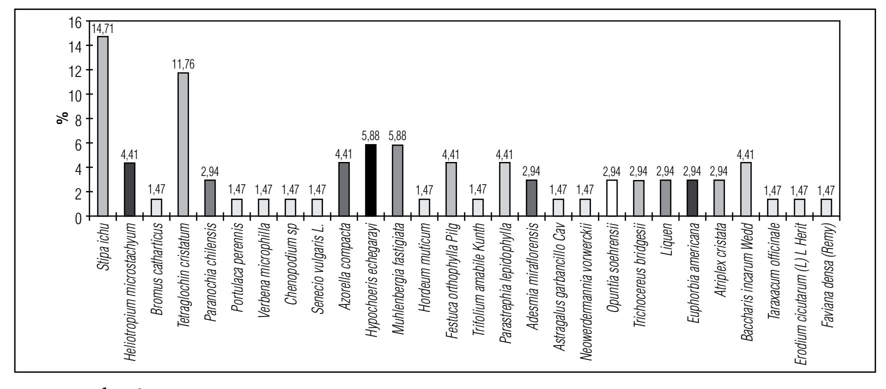


Fuente: Thuska Uma 2009

En la figura 8 se observa las especies que conforman asociación vegetal en alturas entre 3.795 a 3.838 metros sobre el nivel del mar. Allí hay actividad ganadera y por tanto la zona produce forrajes como alfalfa y cebada, lo que implica que *Heliotropium microstachyum, Verbena micrphylla, Portulaca perennis y Azorella compacta* son especies afectadas por las perturbaciones naturales y antrópicas. También se extrae la especie *Tetraglochin cristatum*, que crece a una altitud de 3.785 a 3.805 metros sobre el nivel del mar; esta especie se usa como energético (leña) y como forraje para el ganado. A alturas superiores a 3.795 metros sobre el nivel del mar empiezan a distinguirse especies de los géneros *Verbena, Chenopodium, Azorella, Senecio, Portulaca, Hipochoeris, Muhlembergia, Hordeum, Festuca, Trifolium, Parastrephia, Adesmia, Astragalus* y otras. En la zona, las comunidades vegetales viven en asociaciones vegetales, donde, por su mayor porcentaje, sobresale la presencia de *Stipa, Tetraglochin, Hipochoeris y Mulembergia.*

En el gráfico 11 se muestra que la especie con mayor dominancia es *Stipa ichu*, que se distribuye en la laderas y que está asociada con *Tetraglochin cristatum* (*kaylla*), *Hypochoeris echegarayi* (*siqi*) y *Mulenbergia fastigiata* (*chiji* negro), *Baccharis incarum Wedd* (*ñaka thola), Festuca orthophylla* (paja brava) y otras especies utilizadas como forraje para el ganado. La especie *Baccharis incarum Wedd* (*ñaka thola)* también se usa como biocombustible pues contiene altos porcentajes de resina; crece en laderas, planicies y serranías.

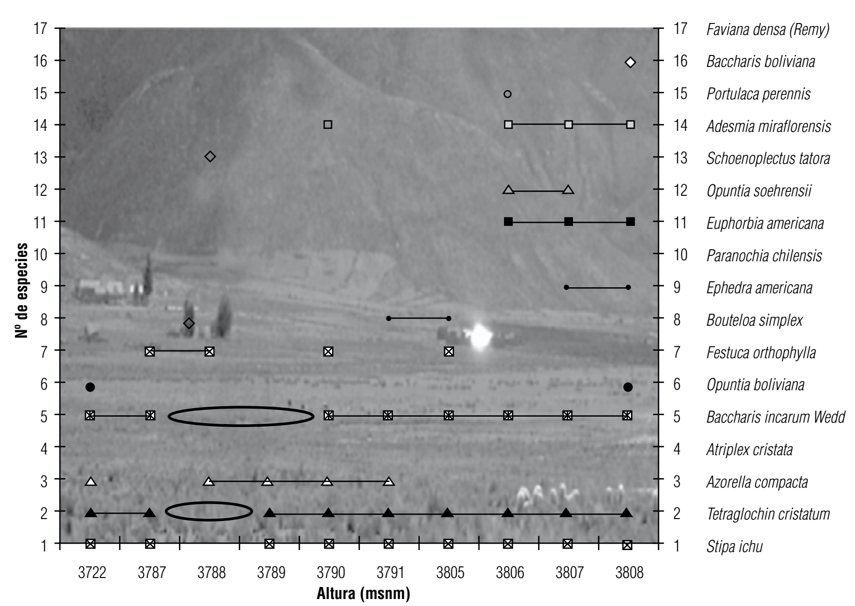
Gráfico 11
Presencia de especies vegetales en la formación vegetal 1 (transecto 1) (expresada en porcentaje)



Fuente: Thuska Uma 2009

En el transecto 1 de la formación vegetal 1 se ha inventariado veintiocho especies. Domina la *Stipa ichu,* cuya presencia alcanza al 14,71%; la especie *Tetraglochin cristatum* tiene presencia de 11,76%; le siguen las especies *Hypochoeris echegarayi* (*siqi*), *Mulenbergia fastigiata* (*chiji* negro), *Baccharis incarum Wedd* (ñaka thola*), Festuca orthophylla* (paja brava), *Bouteloa simplex* (pasto bandera) y otras, que se utilizan como forraje para el ganado. Las especies vulnerables a la actividad antrópica y natural son: *Bromus catharticus, Portulaca perennis, Verbena microphilla, Chenopodium sp., Hordeum muticum, Trifolium amabile Kunth, Astragalus garbancillo Cav, Neowerdermannia vorwerckii, Taraxacum officinale, Erodium cicutarum, Faviana densa (Remy)* y *Senecio vulgaris L*. Estas especies son utilizadas como forraje para el ganado. En la pradera también hay especies de los géneros *Opuntia, Bouteloa, Paranochia, Adesmia, Portulaca, Fabiana, Euphorbia, Faviana* y otras que forman todo un ecosistema.

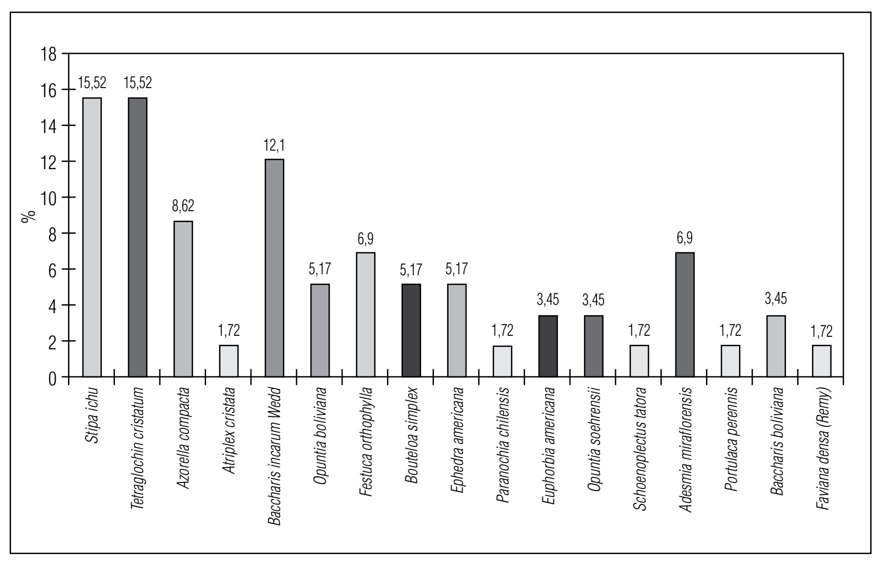
Figura 9
Presencia de especies vegetales en la formación vegetal 1 (transecto 2)



Fuente: Thuska Uma 2009

En la figura 9 se puede observar las especies inventariadas en el transecto 2 de la formación vegetal 1. También presentan perturbaciones que pueden afectar en su forma de vida; sin embargo, se observa que a 3.788 metros sobre el nivel del mar existe ausencia de *Tetraglochin cristatum*, debido a que esta especie es forrajera y a la vez se utiliza como leña. Entre los 3.788 y 3.790 metros sobre el nivel del mar se extrae *Baccharis incarum Wedd* (*ñaka thola*), la cual tiene importancia energética (como leña) para los pobladores de la zona. Otra especie que resulta importante mencionar es *Stipa ichu*, que también es consumida como forraje, en especial por el ganado vacuno y ovino y que presenta resistencia a perturbaciones antropogénicas o ambientales. En alturas superiores a 3.806 metros sobre el nivel del mar aparecen especies del género *Euphorbia, Opuntia, Adesmia, Portulaca, Baccharis y Faviana.*

Gráfico 12
Presencia de especies vegetales en la formación vegetal 1 (transecto 2) (expresada en porcentaje)



Fuente: Thuska Uma 2009

Las especies con mayor dominancia en el transecto 2 son *Stipa ichu* y *Tetraglochin cristatum,* con una presencia en el lugar de 15,52%; la especie *Baccharis incarum Wedd* (*ñaka thola)* tiene un porcentaje de 12,1%; *Azorella compacta* (yareta) tiene un porcentaje de 8,62%; las especies *Adesmia miraflorensis* (*añawaya*) y *Festuca orthophylla* (paja brava) tienen un porcentaje de 6,9%; *Opuntia boliviana, Ephedra americana, Bouteloa simplex* y otras especies se encuentran en porcentajes menores, pero también son consumidas como forraje por el ganado. La pradera es pajonal asociado con una vegetación mixta. Esta vegetación tiene un alto valor económico debido a que da sustento a la ganadería, pero está afectada por factores climáticos extremos como sequías, precipitaciones, heladas y granizo; y a esto se agrega la contaminación antrópica (la contaminación generada por los humanos).

1.1.2. Formación vegetal 2

La formación vegetal 2 es la más afectada por la minería. Se ubica río abajo y está a merced de los desechos industriales del ingenio de Machacamarca y de una empresa minera privada. Estudios realizados por instituciones ambientalistas y la Dirección de Posgrado e Investigación Científica de la UTO en 2008 indican que la ausencia de vegetación y la pérdida de su reproducción es consecuencia directa de la contaminación del suelo.

Según los datos obtenidos en esta investigación, en la formación vegetal 2 la biodiversidad está disminuida y hay baja reproducción. Sin embargo, gran variedad de especies ha sido capaz de repoblar los suelos degradados por diversos factores desarrollando mecanismos fisiológicos para resistir, tolerar y sobrevivir en dichos suelos con alto contenido de metales pesados.

Con todo, en la formación vegetal 2, la biodiversidad de especies es bastante reducida. La especie con mayor presencia es *Festuca orthophylla,* ya que generalmente crece en áreas planas, laderas y terrazas de río, sobre suelos arenosos. Se la podría considerar una formación vegetal casi pura, que se encuentra asociada, casualmente, con los géneros *Bouteloa* y *Aristida.*

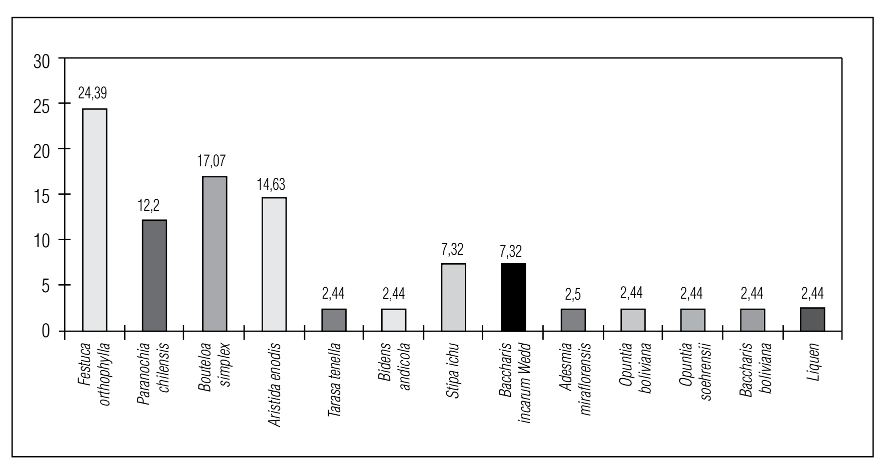
En esta zona, la vegetación es notablemente diferente a la vegetación de las otras zonas. Sólo dominan tres especies vegetales.

Figura 10
Presencia de especies vegetales en la formación vegetal 2

Fuente: Thuska Uma 2009

En la figura 10 se observa que las especies que conforman esta asociación vegetal presentan perturbaciones en alturas entre 3.719, 3.724, 3.727 y 3.750 metros sobre el nivel del mar. La especie *Paranochia chilensis* está ausente, debido a que ya ha sido del todo consumida como forraje (como en esta zona no hay diversidad de especies forrajeras, el ganado se ve obligado a consumir solamente esta especie). De la misma manera, la especie *Bouteloa simplex* presenta perturbaciones a una altitud entre 3.718 a 3.722 metros sobre el nivel del mar y entre 3.739 y 3.781 metros sobre el nivel del mar; también esta especie es consumida como forraje por el ganado y es suculenta. La especie *Aristida enodis* presenta perturbaciones en altitudes entre 3.719 a 3.724 metros sobre el nivel del mal y entre 3.739 a 3.750 metros sobre el nivel del mar, también es consumida por el ganado y se considera una especie palatable. Por otra parte, en altitudes de 3.749 aparecen especies de los géneros *Stipa, Baccharis, Adesmia,Opuntia y Liquen.* Al igual que en la formación vegetal 1, las comunidades vegetales de esta formación viven en asociación, donde por su mayor porcentaje sobresale la presencia del género *Festuca.*

Gráfico 13
Presencia de especies vegetales en la formación vegetal 2
(expresada en porcentaje)

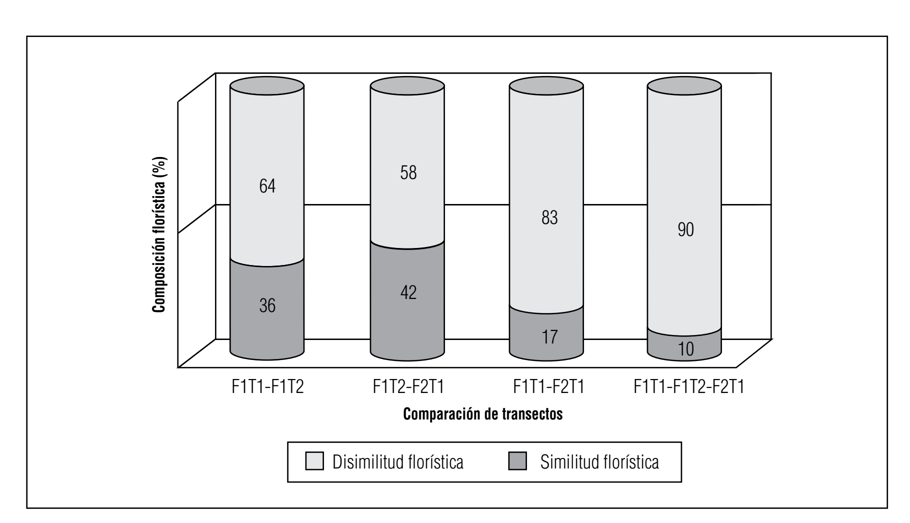


Fuente: Thuska Uma 2009

Del gráfico 13 se concluye que la especie con mayor presencia es *Festuca orthophylla (*paja brava), con un porcentaje de 24,39%; le siguen las especies *Bouteloa simplex*, con 17,07%; *Aristida enodis* con 14,63%; *Paranochia chilensis, Stipa ichu* y otras especies que se encuentran en porcentajes similares de 2,44%.

En tres transectos evaluados en las formaciones vegetales 1 y 2 (F1T1, F1T2 y F2T1) se evidencia que la composición florística es diferente. Hay tan sólo 10% de similitud (véase gráfico 14).

Gráfico 14
Similitud florística entre formaciones vegetales 1 y 2



Fuente: Thuska Uma 2009

1.1.3. Formación vegetal 3

La formación vegetal 3 presenta una vegetación de los géneros *Festuca, Stipa, Hordeum, Tarasa, Schoenoplectus y Erodium*. La zona de estudio tiene como especie con mayor dominancia al género *Festuca*. No es una zona apta para la agricultura, ya que esa formación vegetal es la más afectada por la minería, aunque la excesiva humedad de los terrenos hace que exista vegetación, pero de porte reducido.

Se inventarió las especies que conforman este tipo de asociación vegetal con la metodología del cuadrante (método fitosociológico), que permite inventariar la totalidad. Por esta zona se encuentra el río San Juan de Sora Sora, por tanto las especies que allí crecen se encuentran perturbadas directamente por la actividad minera. Prácticamente se encuentran en un bofedal; pero por la presencia de los metales pesados que contiene el río, los vegetales del lugar crecen muy poco. En el gráfico 15 se observa una similitud florística entre el método del transecto y del cuadrante entre las formaciones vegetales 2 y 3; los resultados muestran una similitud de 7% entre comunidades vegetales de las zonas 2 y 3 y una diferencia de 93%.

Gráfico 15
Similitud florística entre formaciones vegetales 2 y 3

Composición florística (%)
93
7
F2 - F3
Comparación de cuadrantes
Disimilitud florística
Similitud florística

Fuente: Thuska Uma 2009

1.1.4. Formaciones vegetales y estrategias de vida de la flora

En resumen, la flora en las tres formaciones vegetales presenta diferencias significativas debido a las alteraciones antrópicas, climáticas y otras que se han dado en sus comunidades vegetales. La menor diversidad en flora se da en la formación vegetal 2, luego está la formación vegetal 3 y la zona que tiene mayor diversidad es la formación vegetal 1.

Teniendo en cuenta los aspectos mencionados, toda la zona de influencia presenta una sucesión primaria, que se caracteriza por ser lenta. A su vez, el ganado vacuno y ovino provoca que existan lugares con suelo desnudo (con poca cobertura vegetal), lo que origina una sucesión secundaria. La vegetación originada en la sucesión secundaria debido a las perturbaciones se tomó como referencia para la formación vegetal 1 (la menos perturbada) y para las formaciones vegetales 2 y 3 (las más perturbadas).

Las formaciones vegetales presentan una similitud de 10% en cuanto a su composición florística; la diferencia es de 90%.

Junto con las perturbaciones antropogénicas, especialmente por la minería, la extracción de los géneros *Baccharis* para el uso de combustibles y el sobrepastoreo han transformado las comunidades vegetales de toda la zona.

La formación vegetal 1 presenta vida de arbustos de pequeño porte, cuyas yemas de renuevo crecen, como promedio, entre 45 a 50 centímetros sobre el suelo; se desarrollan en un medio relativamente estable, donde existe poca perturbación. Las especies que predominan en esta zona son de desarrollo lento (*Stipa ichu)* y otras que tienen capacidad de competencia como *Tetraglochin cristatum* (tienen una estrategia de vida C. Sin embargo, también existen especies de crecimiento rápido (anual y bianual) debido a las perturbaciones, que por tanto desarrollan una estrategia de vida R[7], según Grime (1979). Esto nos indica que si esta formación vegetal presenta bajas perturbaciones, es de todos modos muy vulnerable a perturbaciones pequeñas, porque aparecen especies de crecimiento rápido y tiene una sucesión primaria que se caracteriza por ser lenta. En las formaciones vegetales 2 y 3, a medida que la vegetación se altera, se producen cambios en el suelo: erosión, disminución del contenido de nutrientes, pérdida de diversidad vegetal, lo que a su vez genera cambios en la fauna silvestre y origina plagas; se presentan desequilibrios ecológicos. En toda esta zona existe mayor perturbación y la estrategia de vida es R.

1.2. Fauna silvestre

No se ha podido generar información directa con respecto a la fauna silvestre de la zona de estudio, ya que para tener información de sus principales taxones se necesita tiempos prolongados y el costo es muy alto. Por tal razón, para realizar esta investigación se recurrió a la ayuda de información secundaria, como el Plan de Desarrollo

---

7 Según Grime (1979), las estrategias de vida R son especies vegetales de porte bajo, crecimiento rápido, colonizadoras y generalmente se encuentran en lugares perturbados (por actividades pecuarias y agrícolas, estas últimas con mayor relevancia). Por otra parte, son especies que se adaptan al estrés del medio. Las estrategias de vida C son especies vegetales que tienen capacidad de competir; se encuentran en lugares que no están muy perturbados, en lugares estables.

Municipal de Machacamarca, donde se menciona la presencia de las siguientes especies: *Liolaemus molinai* (lagartija), *Tineola bisselliella* (polilla), *Apodemus sylvaticus* (ratón de campo) y otras especies como la parina chica.

Según Pearson (1982), hay poca diversidad de mamíferos pequeños en los lugares donde predominan los hábitats de *thola* o pajonal. Por el contrario, en las laderas u otras formaciones rocosas donde se puede hacer nidos o cuevas están presentes numerosas especies, independientemente del tipo de vegetación principal.

El factor de vital importancia para la presencia de mamíferos pequeños, más que la obtención de su alimento, parece ser la exposición, densidad y estructura de la flora, de la cual depende la ventilación de sus madrigueras (Reiig *et al.*1990).

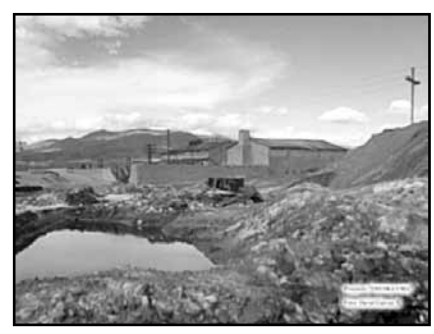
Para la protección de la fauna silvestre se ha establecido tres categorías:

1. Especies protegidas por la legislación boliviana. Se toman en cuenta aquellas que figuran en decretos supremos vigentes y sobre las que se establece la prohibición total de su caza o comercio, sin establecer límites de tiempo.
2. Especies de comercio internacional restringido. Son especies bolivianas que figuran en los Apéndices I y II del Convenio sobre Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestre (CITES).
3. Especies amenazadas de extinción. Están comprendidas las especies bolivianas que figuran en el diagnóstico mundial auspiciado por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) de las especies que presentan diferentes grados de amenaza. Este diagnóstico ha sido publicado como el “Libro Rojo”.

2. Efectos de la contaminación en los recursos hídricos

2.1. Muestreo de aguas

Para determinar el grado de contaminación de las aguas en la zona de nuestro estudio, se tomó dos tipos de muestra: 1) de las aguas que llegan al ingenio de Machacamarca y 2) del área de influencia, aguas en puntos específicos de las comunidades de Machacamarca. Se obtuvo los siguientes datos:





Aguas y suelos están contaminados en las zonas cercanas al ingenio.

Cuadro 22
Muestreo de aguas de los sectores afectados por la minería

Muestra	pH	CE µS	T (en °C)
R-1	7,1	300	16,1
R-2 (1)	5,1	1.556	15,9
R-2 (2)	6,0	1.695	15,9
R-4	4,8	1.454	16
R-5	3,5	1.322	16
R-6	3,7	1.340	16
R-7	3,6	1.201	15,6
R-8	3,7	1.540	16
R-9	3,6	1.396	16
R-10	3,9	1.500	16,0
R-11	3,2	3.908	15,9
R-12	7,2	300	16,1

Fuente: Thuska Uma 2009

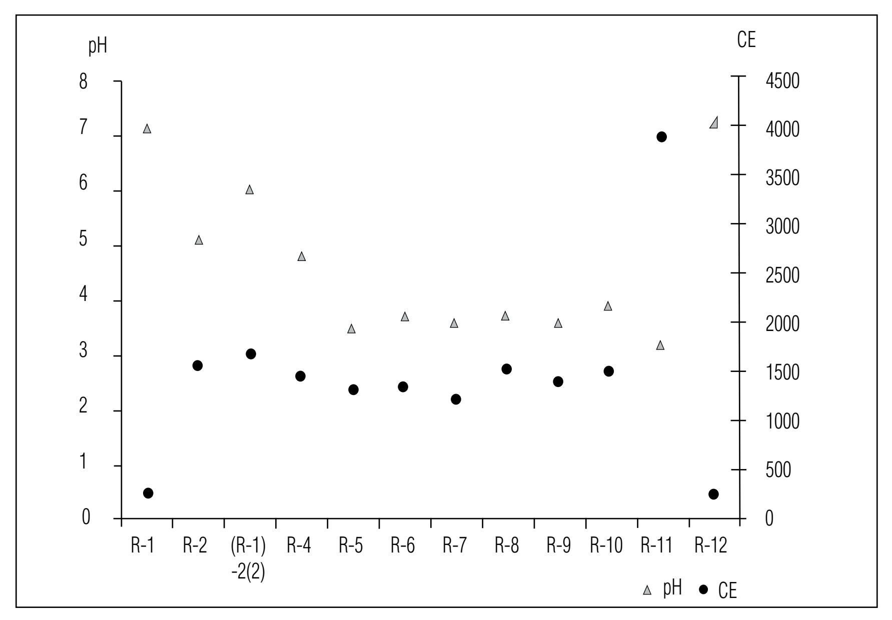
En el cuadro se muestra los resultados según parámetros de conductividad eléctrica (CE), porcentaje de hidrogenésis (pH) y

temperatura. Se debe tomar en cuenta que cuando la temperatura aumenta, el valor del pH baja; y cuando la temperatura disminuye el valor del pH aumenta (Microbiología Ambiental, 1987).

Como se sabe, el pH de una solución es el logaritmo negativo de la actividad del ión hidrógeno; nos da la medida de acidez, neutralidad o alcalinidad de una solución. Tiene una escala de 0 a 14, donde el tramo ascendente de 0 a 6,9 significa acidez, el 7 neutralidad y de 7,5 a 14 alcalinidad (Aquino *et al.* 1989). La concentración total de sales solubles en aguas de riego, para fines de este diagnóstico, se expresó en términos de conductividad eléctrica. Todos estos parámetros permiten evidenciar las propiedades del agua, el drenaje del suelo y la tolerancia a las sales del cultivo que se va producir.

Con estos criterios se pudo observar que la contaminación minera afecta gradualmente al cauce del río al acercarse a los sectores mineros (por sus suelos contaminados), por lo cual el agua ingresa al ingenio ya con cierto grado de contaminación.

Gráfico 16
Relación de la conductividad eléctrica y el pH en afluentes



Fuente: Thuska Uma 2009

En este gráfico, las muestras R-4, R-5, R-6, R-7, R-8, R-9, R-10 y R-11 son los puntos más cercanos al ingenio de Machacamarca y tienen un pH que varía de 4,8 a 3,2, con un promedio de 3,75 (acidez alta), y un parámetro de CE de riesgo moderado a severo. En el caso de R-1 y R-12, los parámetros del pH son neutros y la CE es de riesgo menor. R-2(1)(2) son dos muestras del mismo punto, pero son aguas de diferentes procedencias: (1) viene de la vertiente y (2) de un pequeño reservorio de agua subterránea; se unen y siguen un mismo cauce. Presentaron un pH de 5,1 y 6 respectivamente (aguas ligeramente ácidas) y una CE de riesgo moderado a severo.

En el caso de las comunidades que rodean al ingenio, que también son afectadas por la contaminación, se determinó los siguientes puntos de muestreo:

Cuadro 23
Muestras de aguas de las comunidades de Machacamarca

Muestra	pH	CE µS	T (en ºC)
Aco Aco	6,9	1.015	16
Realenga-Ventilla	8,1	417	16,1
Realenga-Ventilla (pozo)	7,2	628	15,8
Paco Pampa (pozo)	7,1	656	14,2
Chaupi Ingenio	4,9	1.549	15,7
Aguas termales	7,3	8.000	16,2
Toraca Alta	7,2	590	15
Paco Pampa (vertiente)	7,0	1.550	16

Fuente: Thuska Uma 2009






Fuentes de aguas subterráneas en Realenga.

Gráfico 17
Relación de la conductividad eléctrica y el pH en las comunidades

Fuente: Thuska Uma 2009

En el gráfico 17 se muestra cómo están afectadas por la contaminación las aguas destinadas a cultivos y pecuaria. En el caso de Aco Aco, presentan un valor neutro de pH y una CE con riesgo ligero a moderado; en Realenga y Ventilla un pH de 8,1 (alcalino) y una CE con riesgo menor; en Realenga y Ventilla (agua de pozo), Paco Pampa (agua de pozo) y Toraca Alta el pH es neutro y la CE presenta riesgo menor; en los sectores de Paco Pampa (agua de vertiente) y de aguas termales (*karabaños*) el pH es neutro y la CE con riesgo ligero a moderado.

Observando los resultados podemos decir que los sectores mineros no presentan un grado alto de contaminación de sus fuentes de agua; pero si no hay control de la contaminación del río San Juan, las comunidades aledañas serán afectadas tarde o temprano.

En la evaluación de aguas se realizó análisis químicos de dos muestras representativas dentro de la zona de influencia para determinar el grado de contaminación en el que se encuentran, y se obtuvo los siguientes parámetros químicos (que ayudarán a evaluar la calidad del agua para riego de cultivos forrajeros):

Cuadro 24
Análisis de aguas en parámetros para determinar su calidad para riego

			R-9	R-6
Calcio	Ca	mg/l	89,88	88,3
Magnesio	Mg	mg/l	49,61	51,8
Potasio	K	mg/l	10,69	8,46
Sodio	Na	mg/l	119,03	37,89
Boro	B	mg/l	<0,01	<0,01
Cloruro	Cl	mg/l	104	61
Carbonatos	CO_3	mg/l	<3	<3
Bicarbonatos	HCO_3	mg/l	<3	<3
Nitratos	NO_3	mg/l	2,4	2,3
Fosfatos	PO_4	mg/l	0,14	0,08
Sulfatos	SO_4	mg/l	675,3	631,2

Fuente: Análisis del laboratorio Spectrolab, UTO, Thuska Uma 2009

2.2. Análisis químico

Los parámetros más diferenciados son el sodio (Na) y el cloruro (Cl^-). Las muestras se presentan en unidades de miligramo por litro (mg/l), por lo cual es necesario realizar la transformación de esas unidades a miliequivalentes por litro (meq/l). Para la relación de los diferentes parámetros, la transformación se realizó con ayuda del factor de conversión de miliequivalentes por litro (meq/l) a miligramos por litro (mg/l) para diferentes sales.

Gráfico 18
Relación de las muestras y sus análisis químicos

Fuente: Thuska Uma 2009

RAS (relación de absorción de sodio): en el gráfico 18 se puede observar que las muestras de agua presentan una diferencia marcada en las concentraciones del RAS y CE: relacionando esto con las normas de Riverside para evaluar la calidad de las aguas de riego (US Soild Salinity Laboratory), se clasifican en C_3S_1 (aptas para riego), lo que nos indica las siguientes características de las aguas de acuerdo a esta clasificación: 1. *agua de salinidad alta* que puede utilizarse para el riego de suelos con buen drenaje, empleando volúmenes de agua en exceso para lavar el suelo y utilizando cultivos muy tolerantes a la salinidad; 2. *agua con bajo contenido en sodio*, apta para el riego en la mayoría de los casos (sin embargo, pueden presentarse problemas en cultivos muy sensibles al sodio). Si bien esto nos da un referente de la peligrosidad de utilizar ese tipo de agua en suelos ya afectados por la salinidad, sin dejar de lado el grado de tolerancia de las diferentes especies, no indica que el agua no sea apta para riego tradicional.

Sodio: en las concentraciones de porcentaje de sodio intercambiable (PSI), el porcentaje de sodio soluble (PSS) y el porcentaje de sodio extraíble (ESP) hay valores marcadamente diferentes. El sodio es uno

de los factores que influyen en la calidad del agua, por sus efectos en el suelo y en la planta. En el caso del PSS, el límite permisible es de 80% para 10 meq/l de sales totales; y para aguas con mayor contenido de sales el 60% es considerado como peligroso (Langelier, en FAO 1973).

Cloro: la CE y la relación que tiene con el cloro tiene efectos en la textura del suelo. Pero de acuerdo con los resultados obtenidos, el cloro se puede clasificar en Cl_1, no dañino para la textura; el ión cloro no tiene efecto sobre las propiedades físicas del suelo y no es absorbido sobre el complejo de cambio.

El sodio y el boro: en el cuadro 25 se puede observar que el sodio se encuentra marcadamente diferenciado, pero el boro no tiene ninguna diferencia. El boro, a diferencia del sodio, es un elemento esencial para el desarrollo de la planta y es relativamente necesario en cantidades mínimas. Si está presente en mayor cantidad que la necesaria, causa toxicidad. Determinaremos el grado de toxicidad del boro con la ayuda del cuadro siguiente, de acuerdo a lo que dice Waters y colaboradores (1972).

Cuadro 25
Clasificación de agua de riego para plantas

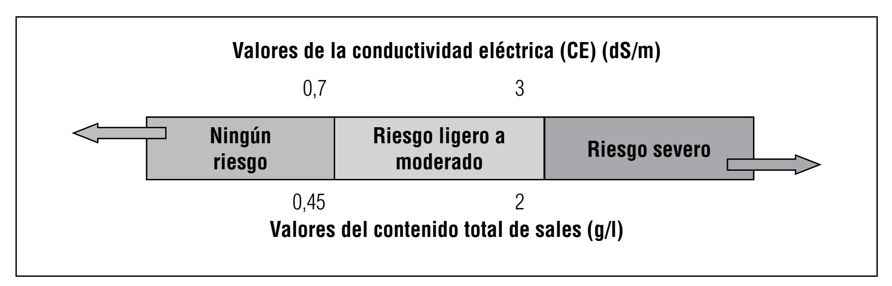
Calidad	CE (1:2)	Na (de sólidos totales disueltos en ppm)*	Boro (ppm)
Excelente	Menos de 0,25	Menos de 20	Menos de 0,33
Buena	0,25-0,75	20-40	0,33-0,67
Permisible	0,75-2	40-60	0,67-1
Dudosa	2-3	60-80	1-1,25
Inadecuada	más de 3	más de 80	más de 1,25

*partes por millón
Fuente: Waters y colaboradores 1972, sistematizado por Thuska Uma 2009

En el cuadro precedente podemos observar que el boro se encuentra en cantidad excelente, mientras que el sodio se encuentra en concentraciones inadecuadas en la muestra R-9 y en un límite bueno en la muestra R-6, lo que da a conocer que las aguas sufren un proceso de salinización y sodificación.

Carbonatos y bicarbonatos: en la muestra se observa una relación de la CE con sales totales que dan parámetro de riesgo de carbonatos y bicarbonatos en el agua de riego. Esta clasificación se hará con la ayuda del siguiente gráfico, donde se observa un riesgo ligero a moderado.

Gráfico 19
Riesgos de la CE y del contenido total de sales



Fuente: Thuska Uma 2009

Según todos los parámetros evaluados, las aguas que ingresan al ingenio de Machacamarca se encuentran con un grado de salinización ligera, sin presentar grados de contaminación o toxicidad en los elementos analizados.

En este contexto, podemos decir que antes de que entren al ingenio, las aguas son adecuadas para el riego de cultivos resistentes a la salinidad (especies halófitas) con un manejo adecuado en la cantidad de aplicación (las prácticas de riego). En resumen, las aguas no presentan toxicidad para los cultivos.[8]

3. Efectos de la contaminación sobre los recursos edáficos

Toda clasificación de suelos se basa en un sistema. El sistema taxonómico, por ejemplo, tiene gran aceptación en el ámbito internacional. En el presente estudio se ha seguido el sistema de Soil Taxonomy del servicio de conservación de suelos del Departamento de Agricultura

8 R-4, R-5, R-6, R-7, R-8, R-9, R-10 y R-11 son muestras de agua del área de investigación.

de Estados Unidos (USDA). Según éste, los suelos se agrupan en órdenes, subórdenes, grandes grupos, subgrupos, familia y serie.

3.1. Descripción de suelos de calicata 1: Alantañita Caravi

Para empezar, hagamos una breve descripción de este suelo.

Horizonte A-0: 39,5 centímetros. Presenta un color café pálido, poca humedad, textura franco-arenosa, espeso sin estructura, algo aglomerado; en su generalidad es de grano suelto, por lo que no tiene estructura definida; no adhesivo, no plástico y sin consistencia ni en húmedo y seco. La presencia de raíces en una profundidad de hasta 35 centímetros.

Capa A-1: 39,5-58,5 centímetros. Presenta color café claro, humedad moderada, textura arenosa, grano suelto, por lo que no tiene estructura definida; no adhesivo, no plástico y sin consistencia en húmedo y seco. Presencia de raicillas; en este sector se presentan láminas de color café oscuro con una textura franco-areno-limosa, con una clara marcación de oxidación del suelo.

Capa A-2: 58,5-99,5 centímetros. Presenta color café pálido, humedad moderada, textura arenosa, grano suelto, por lo que no tiene estructura definida; no adhesivo, no plástico y sin consistencia en húmedo y seco. Presencia de raicillas, se presentan menor número de manchas de color café oscuro.

Capa A-3: 99,5-147,5 centímetros. Presenta color café pálido, humedad buena, textura arenosa, grano suelto, por lo que no tiene estructura definida; no adhesivo, no plástico y sin consistencia en húmedo y seco. Presencia de manchas de color café amarillo, no hay presencia de raicillas. En este sector se presentan menor número de manchas de color café rojizo, presencia de oxidación.

Capa A-4: 147,5 menor. Presenta color café oscuro, textura franco-areno-limosa con una estructura no definida, humedad buena, presenta mayor cantidad de manchas de color café rojizo, con una mayor oxidación. No hay presencia de agua, por lo que se estima que la napa freática se encuentra a mayor profundidad.

3.2. Descripción de suelos de calicata 2: Chaupi Ingenio

Horizonte A-0: 20 centímetros. Presenta color café claro, poca humedad, textura franca, estructura definida como granular, adhesivo, ligeramente plástico y con consistencia en húmedo y seco, presencia de raíces hasta en la superficie, presenta manchas blancas (floración salina).

Capa A-1: 20-48,5 centímetros. Presenta un color plomo claro con manchas blancas, humedad moderada, textura franco-arcillosa, estructura definida granular, poco adhesiva, moderadamente plástica y consistente en húmedo y seco, poca presencia de raicillas.

Capa A-2: 48,5-75 centímetros. Presenta color café oscuro o plomo verdusco, húmedo, textura franco-limosa, estructura definida laminar, adhesivo, plástico y consistente en húmedo y seco, poca presencia de raicillas. En este sector se presentan menor número de manchas de color, manchas blancas.

Capa A-3: 75-110 centímetros. Presenta un color que varía de plomo oscuro a plomo claro, humedad buena, textura franco-limo-arcillosa, estructura definida laminar, adhesivo, plástico y consistente en húmedo y seco, presencia de manchas de color café amarillo y manchas blancas, no hay presencia de raicillas.

Capa A-4: 110 < . Presenta un color plomo claro, textura franco-arcillosa, con una estructura no definida, humedad alta, mayor cantidad de manchas de color café rojizo, amarillo y blanco, con una mayor oxidación, presencia de filtración de agua, por lo que se estima que la napa freática se encuentra a pocos centímetros de profundidad.

3.3. Clasificación por capacidad de uso

La clasificación por capacidad de uso es el ordenamiento sistemático, práctico e interpretativo de los diferentes grupos de suelos con el fin de mostrar sus usos. Esta clasificación se basa en las limitaciones permanentes del suelo, el cual requiere continuas prácticas para superar los riesgos después de que ha sido acondicionado para el uso.

El sistema utilizado para la clasificación es el "Land Capability" del Servicio de Conservación de Suelos del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, diseñado por Kligebiel y Montgomery en 1961 y traducido al castellano en 1962. La clasificación por capacidad de uso es una agrupación muy amplia y clasifica a los suelos en ocho clases, desde I a VIII. Las limitaciones y los riesgos aumentan progresivamente conforme se sube de clase.

Así, las cuatro primeras clasificaciones son aptas para cultivos anuales de escarda y las cuatro restantes no son aptas para cultivos de escarda, limitando su uso para ganadería y bosque. La clase VIII mayormente está destinada para fines de recreación y vida silvestre.

Tierras aptas para cultivos anuales de escarda y otro usos

Clase I: tierras aptas para cultivos anuales de escarda y otros usos; son suelos que tienen poca o ninguna restricción de uso, son de topografía plana, profundos, bien adecuados, fáciles de trabajar, con buena capacidad de retención de humedad y responden a la fertilización.

Clase II: suelos con algunas limitaciones que requieren moderadas prácticas de conservación. Las limitaciones incluyen efectos individuales o combinados, que pueden ser prácticas de conservación de ingeniería, control del agua o métodos de laboreo cuando son usados en la agricultura.

Clase III: suelos con severas limitaciones que requieren prácticas especiales de conservación, cuando son usados para cultivos agrícolas. Las prácticas de conservación son generalmente difíciles de aplicar y de mantener.

Clase IV: suelos con muy severas limitaciones y de uso limitado, requieren un laboreo muy cuidadoso. Cuando estos suelos son cultivados requieren cuidadosas prácticas de trabajo y de conservación que es difícil de aplicar y mantener.

Tierras de uso limitado y generalmente no aptas para cultivos anuales de escarda

Clase V: suelos con poca o ninguna limitación por erosión; sin embargo tienen otras limitaciones en su uso para agricultura permanente (pastos o vida silvestre), son suelos casi planos que tienen limitaciones climáticas o combinación de otras limitaciones que restringen el cultivo de algunas especies de plantas. La mayor parte son susceptibles a inundaciones.

Clase VI: suelos con severas limitaciones que los hacen generalmente inadecuados para cultivos; las limitaciones son mayormente pendiente, pedregosidad, excesiva humedad, salinidad o alcalinidad.

Clase VII: suelos con muy severas limitaciones que los hacen inadecuados para cultivos, por sus pendientes y pedregosidad.

Clase VIII: suelos con limitaciones que impiden su uso para la producción de cultivos. Están destinados a la preservación de la vida silvestre, para protección de cuencas y fines de recreación.

Cuadro 26
Descripción de la zona de muestreo

Muestra	Fecha	Coordenadas UTM		Altura msnm	Microtopografía	Características vegetales
		E	N			
Suelos sector de evaluación						
R-01	5/03/09	714072	7990813	3775	Pequeñas formaciones de bofedales en sectores de encharcamientos de aguas.	*Chillca*, paja brava, *thola* (*Calamagrosti*) y resto de cultivos anuales. Suelos ubicados sobre pendientes planas a casi planas de 0 a 6% de inclinación, sobre materiales coluvioaluviales, con presencia de grava y algo de piedra.
R-02	5/03/09	713138	7990864	3774	Planicie, sector de cultivos forrajeros (nativos e introducidos.	Paja brava, pasto bandera (*Nasella*) y restos de cultivos anuales. Suelos moderadamente profundos a profundos sin problemas de salinidad, presencia de grava y algo de piedra.
R – V Realenga Ventilla	5/03/09	717336	7990580	3798	Pie de monte y sectores cultivados.	Pasto bandera, paja brava, *thola* (*Baccharis*) y parcelas con restos de cultivos anuales. Suelos moderadamente profundos a profundos en pendientes de 0 a 10% (planos a casi planos y ligeramente inclinados).

(Continúa en la página siguiente)

(Viene de la página anterior)

R – 04	5/03/09	712688	7991029	3770	Sector de pie de monte con de praderas de cultivo.	*Thola* (*Baccharis*), pasto bandera, garvancillo (*Vicias*), kainlla y parcelas con restos de cultivos de cebada, quinua y otros. Suelos ubicados en lugares planos a casi planos, 0 a 6% de pendiente, con grava y piedra en el subsuelo, alta susceptibilidad a la erosión hídrica y eólica.
Chaupi Ingenio	5/03/09	712901	7990766	3750	Fondo de pequeño bofedal.	Paja brava (*Stipa*), *thola* (*Baccharis*) y parcelas con restos de cultivos anuales. Suelos profundos, en sitios planos a casi planos, con alta susceptibilidad a erosión especialmente cuando se encuentran descubiertos.
Toraca Alta	5/03/09	715185	7985805	3786	Planicie, suelo con cultivo de haba y en descanso.	Paja brava, *thola* (*Baccharis*), *Parastrephia*, pasto bandera y otros pastos. Suelos profundos con algunos horizontes endurecidos, en zonas de depresión se notan problemas de acumulación de sales en la superficie del suelo.
Paco Pampa vertiente	5/03/09	719688	7984038	3818	Pie de monte del sector de Paco Pampa.	Paja brava, *Calamagrosti, Nacella* y parcelas con restos de cultivos anuales. Suelos profundos en lugares planos a casi planos, sin grava ni piedra. Formados sobre materiales aluviales.

Fuente: Thuska Uma 2009

3.4. Resultados de los análisis físicos de los diferentes horizontes del suelo

En el análisis físico de las muestras se obtuvo datos de densidad aparente (Da), densidad real (Dr), porosidad, humedad y textura del suelo a diferentes profundidades, como se muestra en el siguiente cuadro:

Cuadro 27
Propiedades físicas de los horizontes (calicata 1 Alantañita)

Altura	Clase de textura	Da gr/cc	Dr gr/cc	% porosidad	% humedad
0-58	Arena	1,24	2,5	50,6	5,392
58-99	Arena	1,21	2,7	54,8	1,163
99-160	Arena	1,3	2,5	48,1	1,431

Fuente: Thuska Uma 2009

Se puede observar que la Da no varía significativamente en las primeras capas y se eleva en la última capa, mientras que la Dr varía en la segunda y no así en las otras dos capas, lo que da parámetros de densidad de un suelo arenoso (suelto). Con estos datos se puede

determinar que las propiedades físicas del suelo (textura, porosidad y humedad) a diferentes profundidades varían significativamente. Hay una relación homogénea de la textura; el contenido de humedad presenta un valor no tan diferenciado en las dos últimas capas y presenta un valor mayor en la parte superficial; la porosidad varía en todas las capas, su valor máximo se encuentra en la parte media, tiene un valor promedio en las otras dos capas. Predomina un suelo suelto (arenoso).

Las zonas cultivables del sector de Machacamarca tienen pues suelos sueltos, no tan aptos para la agricultura por el poco porcentaje de humedad que retienen y son altamente susceptibles a la erosión (eólica e hídrica) por la poca vegetación que existe en el sector.

Cuadro 28
Propiedades físicas de horizontes (calicata 2 Chaupi Ingenio)

Altura	Clase de textura	Da gr/cc	Dr gr/cc	% porosidad	% de humedad
0-20	Migaron arenoso	1,3	2,2	40,2	34,818
20-48,5	Franco	1,6	2,2	29,1	20,448
48,5-75	Migaron arenoso	1,1	2,2	52,3	24,672
75-110	Franco	1,5	2,2	31,6	36,399

Fuente: Thuska Uma 2009

La segunda calicata presenta valores diferentes de densidad aparente (Da). Tiene formación de pequeño bofedal; la saturación de los poros por el agua es significativamente determinante en la Da del suelo, en su densidad real (Dr) no varía la relación.

Las propiedades físicas del suelo varían según las alturas. Presenta texturas de migaron arenoso y franco, y una relación variada de su porosidad pues los sectores más profundos están afectados por una fuerte humedad que forma el bofedal. Dadas estas condiciones, las capas más profundas son afectadas por la contaminación minera del río San Juan, tomando en cuenta que los minerales pesados disueltos en el proceso de extracción y purificación del ingenio son transportados a este suelo por efecto de su capilaridad y permeabilidad. Los contaminantes pasan al suelo y por tanto a las plantas.

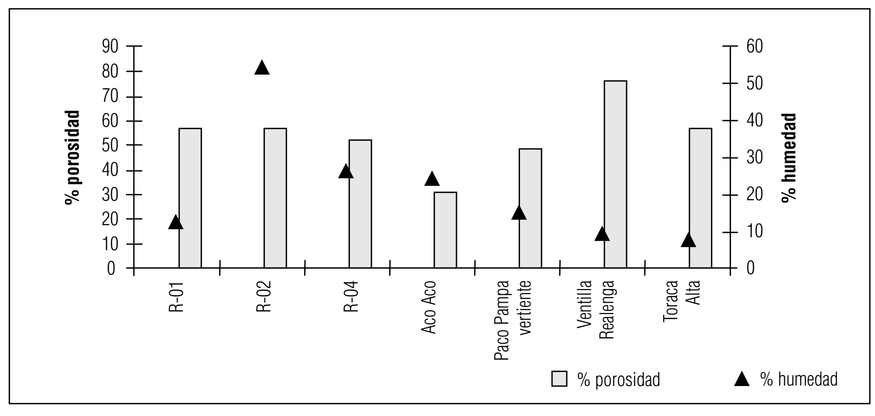
La humedad en el suelo ha generado la presencia de varias especies vegetales nativas, que a su vez sirven de alimento para el ganado. Pero todo este sistema corre riesgo de contaminación y posterior desaparición, como ya ha sucedido aguas arriba por efecto de la percolación y la capilaridad de los suelos cercanos al río, que se han convertido en suelos mineralizados (de color plomo claro a oscuro).

Cuadro 29
Propiedades físicas de los suelos cultivables

Muestras de suelo Código	Clase de textura	Da gr/cc	Dr gr/cc	% de porosidad	% de humedad
R-01	Migaron arenoso	1,1	2,7	57,6	12,686
R-02	Franco	1,1	2,7	57,8	54,618
R-04	Migaron	1,3	2,7	53,1	26,628
Aco Aco	Franco	1,7	2,5	31,9	24,163
Paco Pampa vertiente	Franco	1,4	2,7	49,2	15,059
Ventilla Realenga	Migaron limoso	0,6	2,5	77,4	9,238
Toraca Alta	Migaron limoso	1,0	2,4	57,6	7,524

Fuente: Thuska Uma 2009

Gráfico 20
Diferencia de las propiedades físicas de los suelos cultivables



Fuente: Thuska Uma 2009

Los sectores más altos de la zona, como Toraca Alta, Ventilla, Realenga y AcoAco, no se ven afectados por la contaminación minera al

no presentar un grado de humedad alto; sus suelos tampoco presentan señales de contaminación minera (color plomo claro a oscuro). En los sectores de muestreo representados con la letra "R", la humedad aumenta porque están más cerca del río; la tonalidad de sus suelos evidencia contaminación (plomo claro a oscuro). Este fenómeno se debe al movimiento del agua contaminada en el suelo.

Así, se determinó que las partes más bajas y más cercanas al río San Juan son las más afectadas por la contaminación minera. Las partes más altas podrían ser afectadas a futuro si no se toma precauciones en el manejo del agua contaminada.

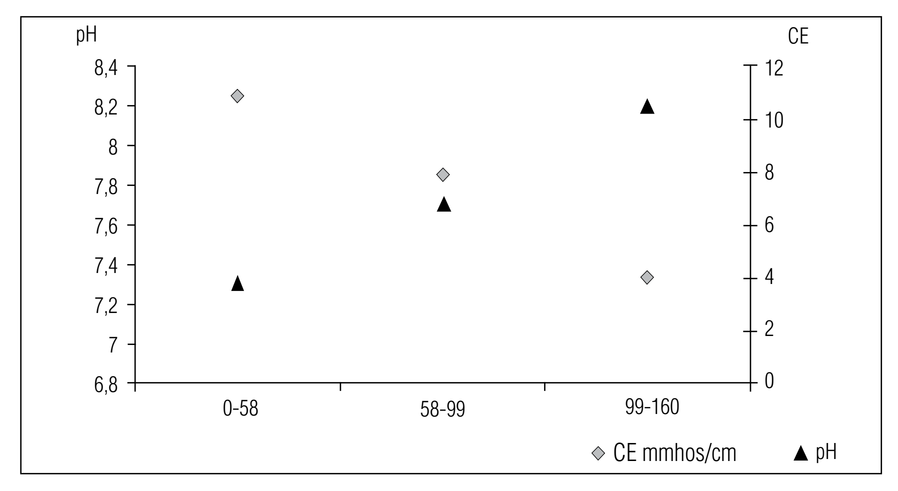
Cuadro 30
Diferencia del porcentaje de humedad en el horizonte (calicata 1 Alantañita)

Muestra	Psh (gr)	Pss (gr)	% H	CE µS/cm	pH	CE milimhos/cm
0-58	129,0	122,4	5,392	10.890	7,3	10,89
58-99	130,5	129,0	1,163	7.890	7,7	7,89
99-160	134,7	132,8	1,431	4.040	8,2	4,04

Fuente: Thuska Uma 2009

El parámetro de humedad del suelo indica qué tan cerca existe una corriente de agua subterránea, el color del suelo indica si existe contaminación minera, que se expresa con una coloración plomiza que va de clara a oscura. Tomando en cuenta que el agua contaminada se mueve en las capas más profundas del suelo, se puede observar que en la calicata 1 no hay contaminación, pues se trata de la parte alta de Machacamarca, que está alejada del río. No se encontró contaminación significativa y sí baja humedad. La mayor humedad se encuentra en la parte superficial y no así en las partes más profundas.

Gráfico 21
Diferencia del porcentaje de humedad en el horizonte
(calicata 1 Alantañita)



Fuente: Thuska Uma 2009

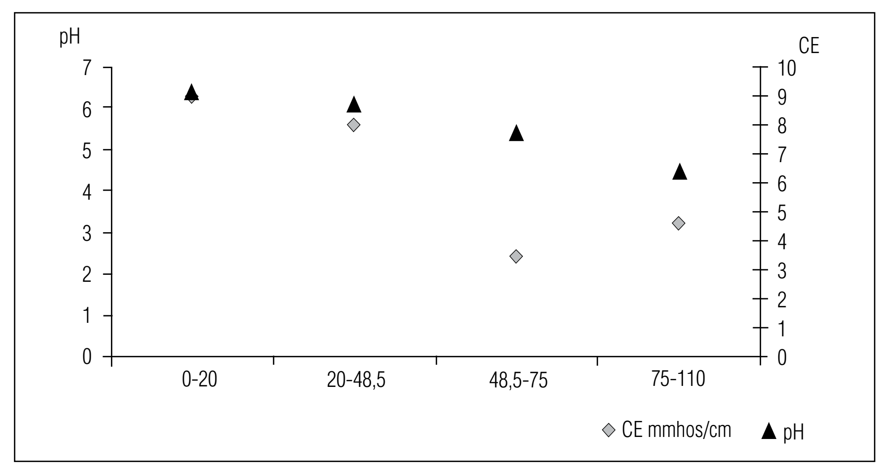
La relación de la CE con el pH muestra que en las partes más húmedas pueden haber más sales solubles. En el gráfico se puede ver que las sales son transportadas por la humedad del suelo: en la parte superficial se presenta una humedad mayor por el efecto de la evaporación del agua, el agua sube por el aumento de la temperatura, arrastrando las sales de las capas profundas a la parte superficial.

Cuadro 31
Diferencia del porcentajep de humedad en el horizonte
(calicata 2 Chaupi Ingenio)

Muestra	Psh (gr)	Pss (gr)	H	CE µS/cm	pH	CE milimhos/cm
0-20	133,2	98,8	34,818	8.990	6,4	8,99
20-48,5	166,7	138,4	20,448	7.987	6,1	7,987
48,5-75	132,9	106,6	24,672	3.456	5,4	3,456
75-110	210,6	154,4	36,399	4.567	4,5	4,567

Fuente: Thuska Uma 2009

Gráfico 22
Diferencia del porcentaje de humedad en el horizonte (calicata 2 Chaupi Ingenio)



Fuente: Thuska Uma 2009

En este segundo perfil se ha podido observar que las humedades son mayores y las capas del horizonte presentan una tonalidad plomiza que va de claro a oscuro, lo que indica algún grado de contaminación minera por encontrarse cerca del río y en una parte baja donde el agua contamina y degrada directamente.

Por los valores que muestra el pH se puede observar alto grado de acidificación de las capas del suelo; este fenómeno se debe al contenido de humedad del suelo que reduce el aire en él y satura sus poros con el movimiento de contaminantes del agua. La conductividad eléctrica presenta valores altos a bajos por el efecto de neutralización con soluciones ácidas y soluciones básicas.

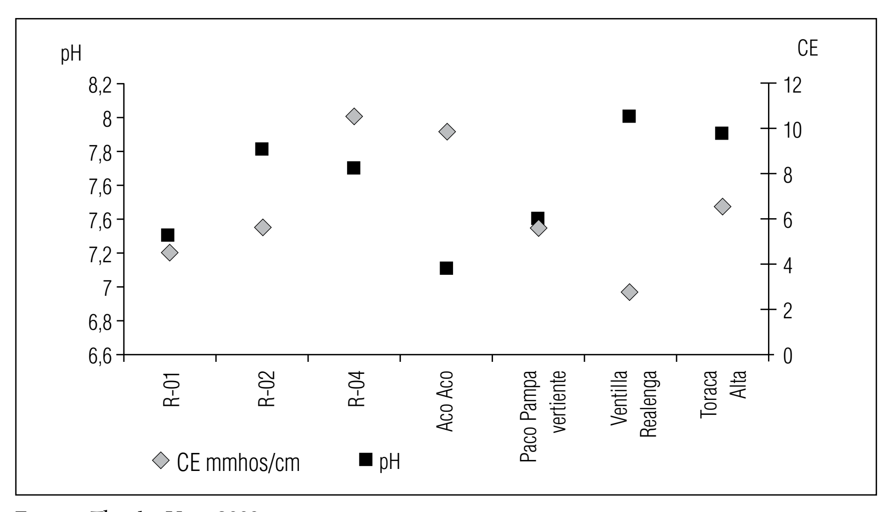
En este lugar, los suelos están afectados por el agua contaminada debido al movimiento que realiza a sus partes profundas depositando compuestos contaminantes que se acumulan en los espacios porosos del suelo y van degradando sus propiedades físicas y químicas.

Cuadro 32
Diferencia del porcentaje de humedad en los sectores cultivables

Muestra	Psh (gr)	Pss (gr)	%H	CE µS/cm	pH	CE mmhos/cm
R-01	204,3	181,3	12,686	4.560	7,3	4,56
R-02	174,1	112,6	54,618	5.660	7,8	5,66
R-04	324,8	256,5	26,628	1.0567	7,7	10,567
Aco Aco	255,9	206,1	24,163	9.878	7,1	9,878
Paco Pampa vertiente	391,2	340,0	15,059	5.670	7,4	5,67
Ventilla Realenga	189,2	173,2	9,238	2.760	8,0	2,76
Toraca Alta	221,5	206,0	7,524	6.570	7,9	6,57

Fuente: Thuska Uma 2009

Gráfico 23
Variación del pH y la CE en suelos cultivables
de las comunidades cercanas



Fuente: Thuska Uma 2009

En el gráfico 23 se observa una elevada humedad en los sectores bajos R-02 y R-04, mientras que en los demás hay una humedad baja. Éstos últimos son áreas cultivables y no se encuentran afectadas por las aguas contaminadas. La medición del pH indica salinización. La CE en R-4 y Aco Aco presenta un valor crítico para los cultivos. En los demás sectores se presenta una salinización moderada.

De acuerdo a esos parámetros, los suelos de los sectores afectados por las aguas contaminadas presentan serios cambios en sus propiedades físicas y químicas y la productividad de esos terrenos está degradada. En los sectores alejados de las aguas contaminadas se observa que sus propiedades físico-químicas no están afectadas y la producción de los cultivos es buena.

Capítulo VI

Resultados del tratamiento de aguas contaminadas

1. La sedimentación

La sedimentación es una operación física que se usa como tratamiento primario para aguas residuales. Supone la reducción o acondicionamiento de los sólidos, para luego pasar al tratamiento secundario, que comprende otras operaciones. La separación de los sólidos por sedimentación se basa en la diferencia de peso específico entra las partículas sólidas y el fluido donde se encuentran.

La bibliografía técnica muestra diferentes tipos de sedimentación. Para este proyecto se ha elegido los modelos que presenta Jorge Arboleda Valencia, que se detallan en el siguiente cuadro.

Cuadro 33
Diferentes modelos del proceso de clarificación por sedimentación

Clarificación por sedimentación tipo	Características de los sólidos en suspensión	Descripción del proceso	Ejemplos
1	Partículas discretas y aisladas en soluciones diluidas	No hay interacción entre las partículas y el resto del fluido	Movimiento de sedimentación de partículas en desarenadores o presedimentadores
2	Partículas aglomerables en soluciones relativamente diluidas	Las partículas se aglomeran agrupándose en partículas de mayor tamaño	Sedimentación de *flocs* en decantadores horizontales o de placas
3	Soluciones de concentración intermedia	Las partículas interfieren entre sí en su descenso, manteniendo posiciones estables	Deposición de lodos en decantadores de flujo ascendente
4	Soluciones de alta concentración	Se forma una estructura entre las partículas que va modificándose lentamente con el tiempo	Compactación de depósitos de lodos

Fuente: Jorge Arboleda: *Teoría y práctica de la purificación del agua*

En la sedimentación tipo 1, conocida como sedimentación discreta, las partículas que se depositan mantienen su individualidad. En este tipo, las propiedades físicas de las partículas (tamaño, forma, peso específico) no cambian durante el proceso.

En la sedimentación tipo 2, también conocida como sedimentación con floculación, la aglomeración de las partículas va acompañada con cambios de densidad y en la velocidad de sedimentación o precipitación.

En la sedimentación asociada tipo 3 y 4, sedimentación por zonas, las partículas forman una especie de manta que sedimenta como una masa total presentando una interfase distinta de la fase líquida.

1.1. Muestreo de aguas del ingenio de Machacamarca

La exploración de campo realizada en el ingenio de Machacamarca ha permitido establecer dos fuentes de provisión de agua:

a: toma de agua del río, localizada al noreste de la planta

b: toma de agua de vertiente, localizada al este de la planta

El efluente de la planta está orientado hacia la parte este con dirección al río, donde trabajan los relaveros. Dado que el proyecto tiene que trabajar con el efluente del ingenio, se ha tomado la muestra en el efluente que sale del ingenio hacia el dique de colas, identificado así:

e: efluente del ingenio hacia el dique de colas

1.2. Caracterización física y química de las aguas

Los análisis de las muestras tomadas en los puntos de muestreo, anteriormente descritos, se realizaron en los servicios analíticos del laboratorio químico Spectrolab. Se destacan en el cuadro siguiente, donde se ha adicionado una columna para el agua de clase "B" descrito en los reglamentos de la Ley de Medio Ambiente.

La comparación de los valores del cuadro permite identificar:

- En los tres puntos de muestreo, el valor del pH indica aguas ácidas.
- Presencia de antimonio, cadmio, arsénico y plomo con valores cerca del límite reglamentario, especialmente en los puntos de muestreo de toma de agua para la planta.
- Valores significativos en lo que corresponde a hierro, manganeso y zinc.
- Elevada carga de sólidos suspendidos en el punto de muestreo "e", que corresponde al efluente de la planta hacia el dique de colas.

Cuadro 34
Análisis químico de aguas

Parámetros físicos y químicos	Unidad	Punto muestreo A	Punto muestreo B	Punto muestreo E	Agua Clase B
pH		3,5	3,4	3,5	6 - 9
STD	mg/l				≤ 1000
Sólidos suspendidos	mg/l	42	40	95.537	
Turbidez	NTU	0,05	7	5,80	
DQO*	mg/l	2	2	2	
Antimonio	mg/l	0,003	0,002	0,004	≤ 0,01
Arsénico total	mg/l	0,002	0,002	0,041	≤ 0,05
Estaño	mg/l	<0,5	<0,5	<0,5	≤ 2,0
Cadmio	mg/l	0,12	1,70	2,06	≤ 0,005
Cobre	mg/l				≤ 1,0
Hierro	mg/l	0,9	12,6	283,77	≤ 0,3
Manganeso	mg/l	13,488	20,191	47,693	
Oxígeno disuelto	mg/l				≥ 70% saturación
Plomo	mg/l	0,09	0,15	0,19	≤ 0,05
Sulfatos	mg/l				≤ 400
Sulfuros	mg/l				≤ 0,1
Zinc	mg/l	20,3	25,82	74,938	≤ 0,2

* demanda química de oxígeno
Fuente: Thuska Uma 2009

1.3. Pruebas en laboratorio de la sedimentación

Para los ensayos en laboratorio, se ha seguido inicialmente la recomendación de Ramalho, que indica que para concentraciones que exceden los 500 mg/l (quinientos miligramos por litro), el tipo de sedimentación que se presenta es del tipo 3 y 4 (sedimentación por zonas). En laboratorio se usó la probeta normalizada de 1000 ml (mil miligramos) para el estudio de la velocidad de sedimentación. Sus resultados se muestran en el cuadro y en el gráfico que siguen.

Cuadro 35
Resultados de sedimentación

Volumen (ml)	Altura (cm)	Tiempo (min)
1000	34	0
950	32,3	3
900	30,6	5
850	28,9	6
800	27,2	7
750	25,5	8,5
700	23,8	10
650	22,1	11
600	20,4	12
550	18,7	13,5
500	17	15
450	15,3	16,5
400	13,6	18
350	10,2	19
300	8,5	20
250	6,8	21,3
200	5,1	23
150	3,4	24,5
100	1,7	26

Fuente: Thuska Uma 2009

Gráfico 24
Pruebas de sedimentación

y = -1,3349x + 36,34
R^2 = 0,9915
Altura (cm)
Tiempo (min)

Fuente: Thuska Uma 2009

En el gráfico anterior, que describe el comportamiento de la sedimentación por zonas, se debe destacar que en la fase final la sedimentación se orienta al comportamiento de tipo 1 (sedimentación discreta). Eso se evidencia porque la pendiente, que es la velocidad de sedimentación, es constante; por lo tanto, el dimensionamiento del sedimentador corresponde a la sedimentación discreta.

1.4. Dimensionamiento del sedimentador

La teoría que permite dimensionar el equipo en la sedimentación discreta de partículas se basa en la velocidad de sedimentación, que se debe principalmente a tres factores: el tamaño de partícula, la diferencia de densidad entre la fase líquida y la sólida y la viscosidad del líquido. Dichos factores están relacionados, según la ley de Stokes, en la siguiente fórmula:

$$v = \frac{gd^2\,(\delta_1 - \delta_2)}{\mu}$$

Donde:

v = velocidad final de la partícula en su caída
g = aceleración de la gravedad
δ_1 = densidad de la partícula
δ_2 = densidad del fluido
d = diámetro de la partícula
μ = viscosidad del fluido

Consecuentemente, la velocidad de sedimentación varía de manera directamente proporcional con el cuadrado del diámetro de la partícula, y si el fluido es agua $\delta_2 = 1$, varía con la densidad de la partícula.

La ley de Stokes se aplica a partículas discretas, regulares, esféricas; no a formas como las que suelen adoptar casi todos los sólidos de los lodos. Sin embargo, la relación con el cuadrado del diámetro proporciona la base para mejorar la floculación y la aglomeración de partículas.

1.5. Parámetros para dimensionar tanques de sedimentación

Los parámetros más importantes son: 1) la velocidad de flujo ascensional, 2) el tiempo de retención y 3) la carga máxima de sólidos.

1) *La velocidad de flujo ascensional* o carga superficial es de primera importancia debido a que las partículas gravitan hacia abajo, en contra del flujo de un líquido que sube. Se conoce también como carga superficial o velocidad del exceso de flujo superficial y se define por el cociente:

$$\frac{\text{velocidad de alimentación del efluente } (m^3 / h)}{\text{área superficial del tanque } (m^2)}$$

Según John Arundel, para el diseño de tanques, este parámetro se toma desde el punto de vista conservador, de forma que sus dimensiones correspondan a valores entre 0,5 y 1,0 $m^3/m^2/h$ y que abarquen al más ligero de los lodos activados. Los sólidos más pesados pueden sedimentarse bien cuando la velocidad de flujo es de 2 $m^3/m^2/h$. Para condiciones promedio, suele ser de 1,2 $m^3/m^2/h$.

2) *El tiempo de retención* es el que debe proporcionarse a las partículas para que lleguen hasta el fondo del depósito o a la capa de lodo que se está formando, lo cual se conoce también como tiempo de detención del efluente dentro del depósito. Se define como:

$$\frac{\text{volumen del depósito } (m^3)}{\text{velocidad de alimentación } (m^3 / h)}$$

En el dimensionamiento de tanques de sedimentación tiene gran importancia calcular el tiempo de retención a la velocidad de flujo máxima que se espera tener para una eliminación que se anticipa como 50%. En la práctica de depuración de aguas residuales, el tiempo de retención fluctúa de manera enorme; lo usual es contar con un intervalo de entre cinco a ocho horas en la mayoría de los tanques primarios de sedimentación.

3) *La carga máxima de sólidos* es el tercer parámetro importante; se refiere a la cantidad de sólidos suspendidos que se considera adecuada en el influente que ingresa al depósito, a partir de lo cual se puede calcular la masa de sólidos por tiempo unitario y por superficie unitaria que se puede llevar a ese tanque sin que los sólidos se desplacen hacia arriba y lleguen al canal junto con líquido efluente. La carga de sólidos tiene dos componentes: el que se refiere a la sedimentación de flóculos de lodo por gravedad y el de frecuencia de evacuación de lodos del depósito.

1.6. Dimensionamiento del sedimentador horizontal

La ley de Stokes para la velocidad de sedimentación de partículas discretas se aplica para $Re<0,5$, y para el dimensionamiento del sedimentador se asume que el recipiente se comporta como sigue:

- Es aplicable a la sedimentación tipo 1 para partículas discretas
- El fluido que entra y sale del tanque es uniforme
- Hay tres zonas demarcadas en el sedimentador (zona de entrada, zona de salida y zona de lodos)
- La distribución de partículas es uniforme en todas partes

- Las partículas, al entrar a la zona de lodos, permanecen allí hasta que son barridas del fondo

En la siguiente fórmula se aprecia la disposición de características descritas anteriormente.

En el caso de un tanque rectangular:

$$\text{Tiempo de detención } t = \frac{H}{V_s} = \frac{L}{V}$$

Se toma en cuenta que L>=2W y L>>H

$$\text{Velocidad horizontal } V = \frac{Q}{WH}$$

$$t = \frac{WHL}{Q} = \frac{V_{ol}}{Q}$$

Por tanto:

$$\frac{V_{ol}}{Q} = \frac{H}{V_s}$$

$$V_s = \frac{Q}{LW} = \frac{Q}{A_P}$$

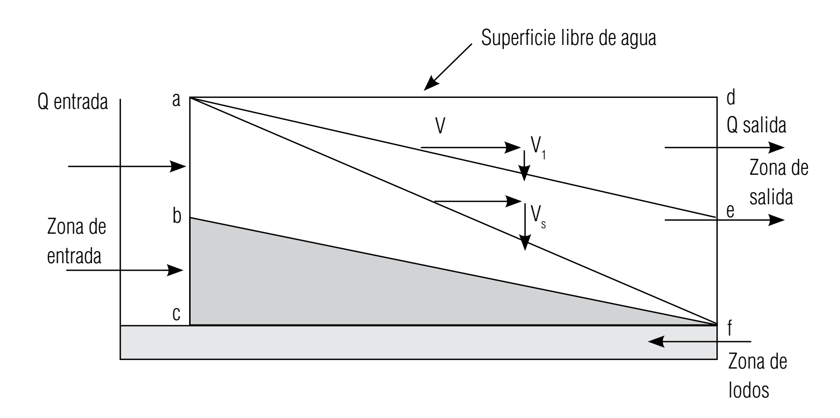
Sin embargo

$$\frac{Q}{A_p} = \text{carga superficial}$$

Donde A_p = área en planta

Por tanto, la velocidad de sedimentación, V_s, es igual a la carga superficial para un tanque rectangular

Gráfico 25
Características de un sedimentador horizontal



V = velocidad horizontal   Vs = velocidad de sedimentación   W = anchura
L = longitud del tanque   H = altura del tanque - profundidad del lodo

Fuente: Thuska Uma 2009

En cuanto a qué porcentaje de partículas descritas se separan, en el gráfico 25 se ve que una partícula que entra al tanque en el punto ‘a’, si sedimenta a V_1, sale del tanque en el punto ‘e’. Una partícula que entra en el punto ‘b’, sedimentando a V_1, deja el tanque en el punto ‘f’. También se observa que $V_1<V_s$. El porcentaje de partículas (sedimentando a V_1) separadas resulta entonces:

$$X_1 = \frac{b - c}{a - c} = \frac{(V_1 \ / \ V)L}{(V_s \ / \ V)L} = \frac{V_1}{V_s}$$

Se debe notar que una partícula que entre en el punto ‘a’ (mayor que la partícula anteriormente descrita), si sedimenta a V_s, saldrá del tanque en el punto ‘f’. Así que todas las partículas sedimentarán con velocidad de sedimentación mayor a V_s. Por lo tanto, si todas las partículas fueran de un tamaño (todas entrando en el punto ‘a’ y sedimentando a V_s) entonces, teóricamente, se podría separar el 100% por decantación.

1.7. Factores que se debe considerar en el diseño de sedimentadores convencionales

Los factores que debe considerarse en el diseño de sedimentadores convencionales de fondo horizontal, específicamente en la zona de sedimentación 1, son: 1) carga superficial; 2) periodo de detención y profundidad; 3) forma de los sedimentadores; 4) velocidad horizontal de escurrimiento y relación largo-profundidad, y 5) número de unidades.

1) *Carga superficial*: se espera que, en promedio, la carga superficial, también denominada *velocidad crítica mínima de sedimentación*, tenga un cierto porcentaje (70% a 98%) de partículas de la suspensión. Para una estimación del valor de carga superficial, se puede adoptar el criterio de Azevedo Netto (1972) que sugiere los valores que figuran en el siguiente cuadro.

Cuadro 36
Carga superficial

Tipo de instalación	Carga superficial	
	$m^3/m^2/d$	$m^3/m^2/h$
Instalaciones pequeñas con operación precaria	20 – 30	0,8 - 1,2
Instalaciones proyectadas con la nueva tecnología, con operación razonable	30 – 40	1,2 - 1,7
Instalaciones proyectadas con la nueva tecnología, con operación buena	35 – 45	1,5 - 1,9
Instalaciones grandes con la nueva tecnología, operación excelente y con auxiliares de coagulación siempre que se necesiten	40 – 60	1,7 - 2,5

Fuente: Jorge Arboleda Valencia: *Teoría y práctica de la purificación*

Las cargas superficiales bajas (20 a 30 $m^3/m^2/d$) se usan en combinación con filtros de arena sola; las altas (35 a 45 $m^3/m^2/d$), con filtros de lecho múltiple. Arboleda recomienda que en países en "vías de desarrollo" las plantas de tratamiento se proyecten para una operación precaria o apenas razonable y no excedan de 45 $m^3/m^2/d$.

2) *Periodo de detención y profundidad*: es el tiempo máximo que la partícula con mínima velocidad de sedimentación escogida tarda en

llegar hasta el fondo. Por tanto, es directamente dependiente de la profundidad del tanque. Cuanto menor sea la profundidad, menor será el periodo de detención necesario para recolectar la partícula.

Los sedimentadores horizontales que trabajan con régimen de flujo turbulento (Reynolds de 2000 a 200000) no pueden construirse con profundidades muy pequeñas debido a que la velocidad de escurrimiento horizontal no puede hacerse muy alta y porque existen interferencias que revuelven el sedimentador (corrientes térmicas y de densidad, etc.)

3) *Forma de los sedimentadores*: pueden ser rectangulares o circulares. Los primeros son los que se usa más frecuentemente en plantas de tratamiento de agua, pues los tanques largos suelen dar los mejores resultados. La relación ancho-largo varía entre 1 a 2,5 y 1 a 10, pero más frecuentemente entre 1 a 4 y 1 a 5.

4) *Velocidad horizontal de escurrimiento y relación largo-profundidad*: la *velocidad horizontal* en sedimentadores rectangulares produce dos efectos opuestos: a) ayuda a la floculación de los sólidos suspendidos dentro del decantador, promoviendo el choque entre ellos y aumentado de esta manera la proporción de partículas finas que pueden ser removidas durante la sedimentación, y b) arrastra y resuspende los flóculos ya sedimentados o que están por sedimentar. Por tanto, es conveniente que la velocidad horizontal sea lo bastante alta como para que estimule la floculación pero sin que llegue a perjudicar la eficiencia del proceso de separación.

Si Q es el flujo que entra al sedimentador, V_{sc} es la velocidad crítica (carga superficial) y V_h es la velocidad horizontal:

$$Q = V_{sc}A_h$$

$$Q = V_hA_v$$

Como:

$$A_h = W_L$$

$$A_v = W_H$$

$$\frac{L}{H} = \frac{V_h}{V_{sc}}$$

Por tanto, la relación longitud (L) de la zona de sedimentación sobre su profundidad (H) dependerá de las velocidades V_h sobre V_{sc} que se escojan; en otras palabras, a igual carga superficial, la relación L/H determinará la velocidad horizontal.

En la práctica se usan las relaciones siguientes:

$$5:1 < L/H < 25:1$$

5) *Número de unidades*: en toda planta de tratamiento de aguas debe haber por lo menos dos sedimentadores, de forma tal que cuando se suspenda uno se pueda seguir trabajando con el otro. Teniendo en cuenta esto, el área total de los decantadores debe incrementarse en un porcentaje adicional, como se especifica en el siguiente cuadro.

Cuadro 37
Porcentaje adicional de sedimentación que debe proveerse

Número de unidades	Carga superficial m^3/m^2/día			
	20	30	40	50
2	0	33	67	100
3	0	11	22	33
4	0	8,5	17,0	25
5 o más	0	7	13	20

Fuente: Jorge Arboleda: *Teoría y práctica de la purificación del agua*

2. Tratamiento de aguas con método pasivo (laboratorio)

2.1. El pH

Se tardó cinco meses en la elaboración del compost de estiércol de llama, estiércol de ovino y residuos de cocina. Para su control, se midió como variables la temperatura de los tres substratos, la temperatura ambiente y la humedad relativa.

Los datos iniciales del pH reportaron un valor de 3,4. A las 24 horas el que tuvo mayor incremento fue el compost de llama, que llegó a 7,4 mientras que los otros dos se elevaron hasta 7,3.

Cuadro 38
Medición de pH a las 24, 48 y 72 horas en los tres tipos de compost

Compost usado	Inicial	24 horas	48 horas	72 horas
Estiércol de llama	3,4	7,4	7,4	7,0
Residuos de cocina	3,4	7,3	7,6	7,4
Estiércol de ovino	3,4	7,3	7,4	7,0

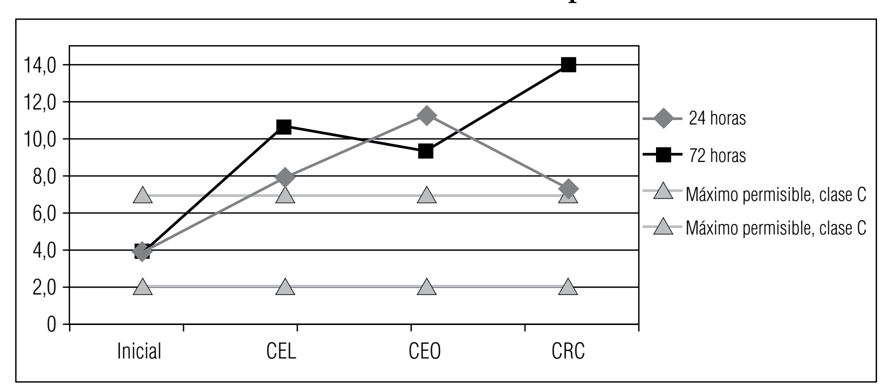
Fuente: Thuska Uma 2009

A las 48 horas, el compost que mejor respondió fue el de residuos de cocina, el pH de las aguas tratadas llegó a 7,6. Las otras se mantuvieron en 7,4. Pasadas las 72 horas, los tres tratamientos descendieron. Pero el de mejor respuesta siguió siendo el compost de residuos de cocina.

2.2. Conductividad eléctrica (CE)

La conductividad eléctrica es una forma indirecta de medir la salinidad. La medición de la CE fue propuesta por Schofield en 1942 y sigue teniendo validez.[9]

Gráfico 26
Conductividad eléctrica a las 24, 48 y 72 horas de tratamiento con compost



CEL: compost de estratos de llama, CEO: compost de estratos de oveja, CRC: compost de restos de cocina
Fuente: Thuska Uma 2009

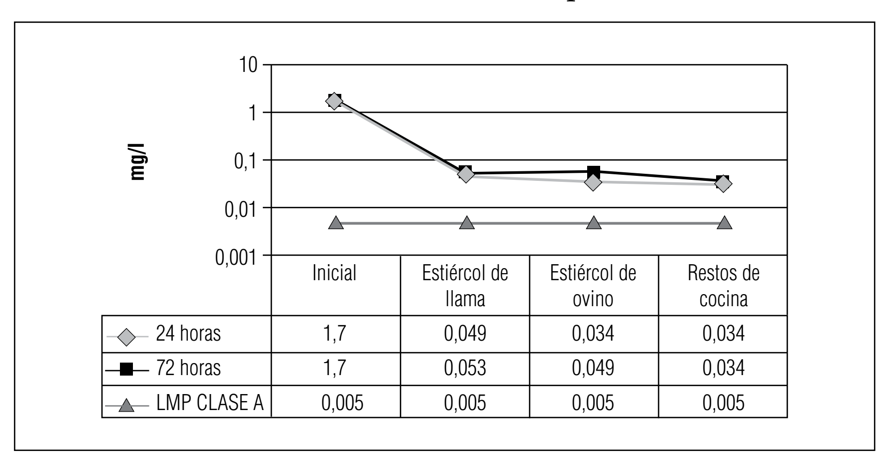
9 El límite es 4dS/m o el equivalente a 4000 μS/cm.

La conductividad eléctrica del agua tratada con el compost de estiércol camélido a las 24 horas fue de 7,91 mmhos/cm, a las 48 horas se incrementó a 10,32 mmhos/cm, y a las 72 horas llegó a 10,59 mmhos/cm. Mientras que la conductividad eléctrica del agua tratada con el compost de restos de cocina, a las 24 horas, fue de 9,12 mmhos/cm; a las 48 horas fue de 11,57 mmhos/cm. Pero el incremento a las 72 horas a 14,02 mmhos/cm fue notable.

2.3. El cadmio (Cd)

En el gráfico 27 se muestra los resultados de precipitación de cadmio a las 24 y 72 horas y se los compara con el límite máximo permitido de presencia de cadmio en aguas de clase "A" (aptas para consumo humano) en la normativa boliviana.

Gráfico 27
Precipitación del cadmio a las 24 y 72 horas de tratamiento con compost



	Inicial	Estiércol de llama	Estiércol de ovino	Restos de cocina
24 horas	1,7	0,049	0,034	0,034
72 horas	1,7	0,053	0,049	0,034
LMP CLASE A	0,005	0,005	0,005	0,005

Fuente: Thuska Uma 2009

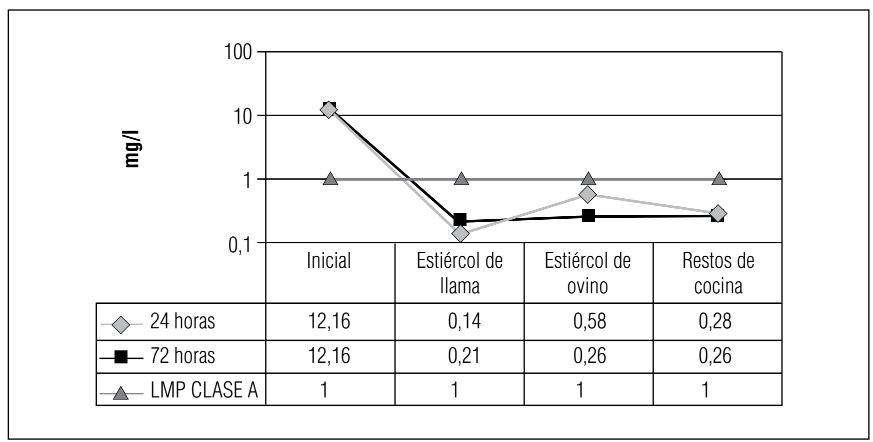
En las aguas tratadas con compost de estiércol camélido, el cadmio tuvo una disminución notable, pues inicialmente el agua contenía 1,7 mg/l de este metal; a las 24 horas, la medida disminuyó a 0,049 mg/l; finalmente, a las 72 horas, se incrementó a 0,053 mg/l. En el compost de restos de cocina, la disminución fue más baja, a 0,34 mg/l, tanto a las 24 como a las 72 horas.

Según la normativa ambiental vigente que se describe en el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica (RMCH) de la Ley 1333 de Medio Ambiente, referida a la clasificación de cuerpos de agua, el valor permisible del cadmio para aguas de clase "A" es igual a 0,005 miligramos por litro de agua (0,005 mg/l).

2.4. El hierro (Fe)

El tratamiento de hierro con compost fue más eficiente, tal como se observa en el siguiente gráfico.

Gráfico 28
Disminución del hierro a las 24 y 72 horas de tratamiento con compost



	Inicial	Estiércol de llama	Estiércol de ovino	Restos de cocina
24 horas	12,16	0,14	0,58	0,28
72 horas	12,16	0,21	0,26	0,26
LMP CLASE A	1	1	1	1

Fuente: Thuska Uma 2009

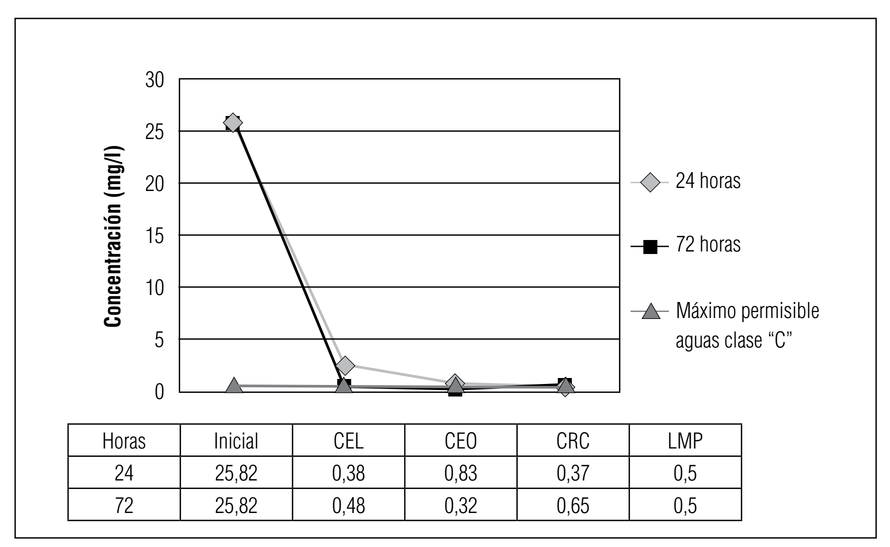
En el compost de llama disminuyó de manera notable, ya que inicialmente contenía 12,12 mg/l, a las 24 horas disminuyó a 0,14 mg/l aunque a las 72 horas incrementó a 0,21 mg/l. De todos modos, en los tres sustratos llegó a medidas por debajo del límite máximo permisible.

El valor permisible de hierro en aguas de clase "A" es de un miligramo por litro (1,0 mg/l), según el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica (RMCH) de la Ley 1333.

2.5. El zinc (Zn)

En las aguas sin tratamiento el zinc alcanza a concentraciones de 25,823 mg/l. Con el compost de llama, el zinc disminuyó de manera notable: a las 24 horas disminuyó a 0,38 mg/l y finalmente a las 72 horas disminuyó a 0,48 mg/l. En el compost de restos de cocina tuvo una disminución mayor: a las 24 llegó a 0,37 mg/l, pero a las 72 horas se incrementó a 0,65 mg/l.

Gráfico 29
Contenido de zinc a las 24 y 72 horas de tratamiento con compost



Horas	Inicial	CEL	CEO	CRC	LMP
24	25,82	0,38	0,83	0,37	0,5
72	25,82	0,48	0,32	0,65	0,5

CEL: compost de estratos de llama, CEO: compost de estratos de oveja, CRC: compost de restos de cocina; LMP: límite máximo permisible
Fuente: Thuska Uma 2009

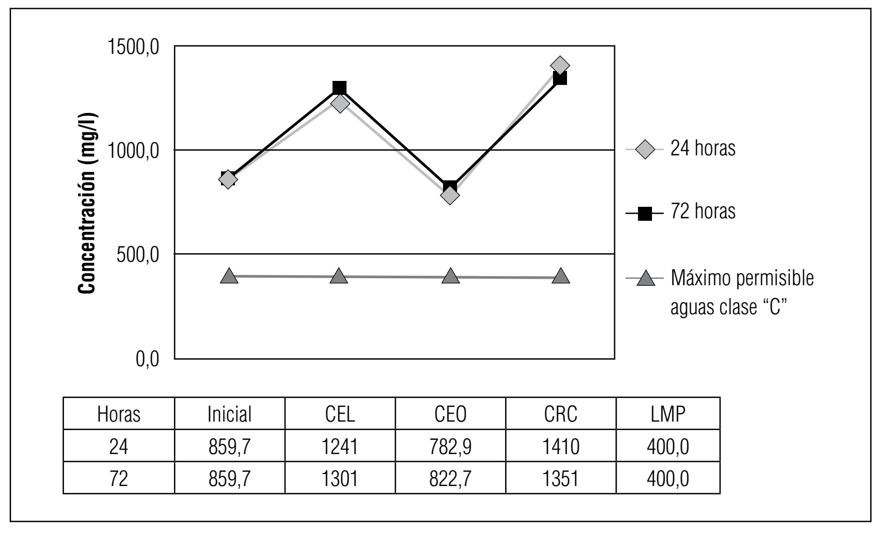
El valor máximo permisible del cadmio en aguas de clase "A" es de 0,5 miligramos por litro de aguas (0,5 mg/l), RMCH de la Ley 1333.

2.6. Los sulfatos

En el compost de estiércol camélido, el sulfato de las aguas contaminadas tuvo un incremento notable, ya que inicialmente contenía 552,9 mg/l; a las 24 horas incrementó a 1241 mg/l, finalmente a las 72 horas incrementó a 1300 mg/l. En el compost de estiércol ovino

incrementó también de manera notable, a las 24 horas, a 782,9 mg/l; y a las 72 horas a 822,7 mg/l.

Gráfico 30
Comportamiento de sulfatos a las 24 y 72 horas de tratamiento con compost



Horas	Inicial	CEL	CEO	CRC	LMP
24	859,7	1241	782,9	1410	400,0
72	859,7	1301	822,7	1351	400,0

CEL: compost de estratos de llama, CEO: compost de estratos de oveja, CRC: compost de restos de cocina, LMP: límite máximo permisible
Fuente: Thuska Uma 2009

En el compost de restos de cocina incrementó, de manera igualmente notable, a 1410,4 mg/l a las 24 horas, y a 1351 mg/l a las 72 horas.

3. Tratamiento de aguas con método pasivo (planta piloto en el ingenio de Machacamarca)

El tratamiento experimental de aguas se inició en julio de 2009 en una planta piloto instalada en el ingenio de Machacamarca y se extendió hasta fines de diciembre de ese año. Se realizó un monitoreo de aguas sin tratamiento y de aguas tratadas desde enero a diciembre de 2009.

En diferentes periodos del año, se analizó alrededor de veintitrés parámetros, entre físicos, químicos y biológicos. Al inicio, se ana-

lizó las aguas sin tratamiento del entorno del ingenio y del dique de colas. Luego, se hizo las pruebas con los sustratos (compost de estiércol de llama, de estiércol de ovino y de residuos de cocina) a las 24 y 72 horas, al inicio y después del tratamiento y al mes del tratamiento, poniéndose en funcionamiento la planta con microorganismos aeróbicos y anaeróbicos. Los resultados se presentan en el siguiente cuadro 39.

Al inicio, se realizó un análisis de dieciséis elementos en el agua sin tratamiento. Se encontró una diferencia sustancial en los parámetros de las concentraciones del dique de colas y el entorno del ingenio. De esas concentraciones se seleccionó seis elementos (cadmio, hierro, zinc, manganeso, sulfatos y sulfuros) porque rebasaban enormemente los límites permisibles normados en la Ley de Medio Ambiente.

3.1. Comportamiento de los diferentes parámetros en el agua sin tratamiento

Para el estudio se tomó cinco muestras de agua contaminada. La primera muestra se tomó de la descarga del dique y las otras se tomaron de la lamela de sedimentación. Se comparó los valores que se encontraban fuera de los rangos del Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica (RMCH), en este caso cadmio, hierro, zinc, sulfatos y sulfuros.

Cuadro 39
Análisis químico de los distintos parámetros del agua antes y después del tratamiento en el ingenio Machacamarca

Parámetros	Símbolo	Unidades	Límites para aguas clase "B"	Aguas sin tratamiento (21/01/09)			Aguas s/t (22/04/09)	Aguas tratadas a las 24 horas (19/05/09)			Aguas tratadas a las 72 horas (19/05/09)			Agua en el IM a 24 horas (20/07/09)		Agua en el IM al mes (14/08/09)		Aguas d/t (28/08/09)	Aguas d/t aerebio (24/09/09)	Aguas d/t anaerebio (22/10/09)	Aguas s/t (08/12/09)	Aguas d/t (08/12/09)
				205	206	207	C - AI	T1	T2	T3	T1	T2	T3	TL	TC	TL	TC	TA-100	TC	TC-F	AA - F	AT - F
pH			6	3,500	3,400	3,500																
Sólidos suspendidos		mg/l		42,000	40,000	95537,000								177	104							
Turbidez		NTU	10	7,000	5,800	8810,000																
DQO (demanda química de oxigeno)		mg/l	50	< 2	2,000	2,000												56				
Acidez		mg/l		5,400	4,500	3,100																
Alcalinidad		mg/l		< 0,1	< 0,1	< 0,1																
Antimonio	Sb	mg/l	0,01	0,003	< 0,002	0,004																
Arsénico	As	mg/l	0,05	< 0,002	< 0,002	0,041																
Cadmio	Cd	mg/l	0,005	0,120	1,700	2,060	0,953	0,049	0,034	0,034	0,053	0,049	0,034	0,624	0,060	0,916	0,034	< 0,002	0,012	0,024	0,791	< 0,002
Cromo	Cr	mg/l	0,05	< 0,03	< 0,03	< 0,03																
Estaño	Sn	mg/l	2	< 0,5	< 0,5	< 0,5																
Hierro	Fe	mg/l	0,3	0,900	12,160	283,770	12,120	0,140	0,280	0,580	0,210	0,260	0,260	6,820	0,250	8,520	3,110	3,150	2,790	0,780	0,190	0,220
Manganeso	Mn	mg/l	0,5	13,488	20,191	47,693										14,7	12,96		19,401	16,703	14,927	16,803
Níquel	Ni	mg/l	0,05	0,450	0,500	0,630																
Plomo	Pb	mg/l	0,05	0,090	0,150	0,190										< 0,03	< 0,03		< 0,1	< 0,1		
Zinc	Zn	mg/l	0,2	20,300	25,823	74,938	36,323	2,483	0,370	0,834	0,483	0,328	0,656	26,681	0,476	35,149	2,873		0,430	0,260	41,730	0,330
Sulfatos	SO_4	mg/l	300				552,9	1241	1410,4	782,9	1301	1351	822,7	859,7	1389,6	756,500	826,300		713,4	665,000	892,000	639,100
Sulfuros	S	mg/l	0,1				< 0,001	0,076	0,019	0,021	0,198	0,05	0,016	0,001	0,013	0,012	1,601					
Calcio	Ca	mg/l	200															327,13			190,24	368,24
Fósforo total	PT	mg/l																4,5				
Magnesio	Mg	mg/l	100															103,06				
Mercurio	Hg	mg/l	0,001																< 0,001			
Nitrógeno total	NT	mg/l	5																13	11	11	13
Potasio	K	mg/l																			33,94	41,24

Fuente: Thuska Uma 2009, con datos de Spectrolab

Cuadro 40
Parámetros de comportamiento de diferentes elementos en el agua sin tratamiento del ingenio de Machacamarca

Parámetros	Símbolo	Unidades	Límite en aguas clase "B"	Límite en aguas clase "D"	Aguas sin tratamiento (21/01/09)	Aguas s/t (22/04/09)	Agua en el IM a 24 horas (20/07/09)	Agua en el IM al mes (14/08/09)	Aguas s/t (08/12/09)
					207	C - Al	TL	TL	AA - F
pH			6	9	3,500				
Sólidos suspendidos		Mg/l			95537,000		177		
Turbidez		NTU	10	200	8810,000				
DQO*		Mg/l	50	60	2,000				
Acidez		Mg/l			3,100				
Alcalinidad		Mg/l			< 0,1				
Antimonio	Sb	Mg/l	0,01	0,01	0,004				
Arsénico	As	Mg/l	0,05	0,1	0,041				
Cadmio	Cd	Mg/l	0,005	0,005	2,060	0,953	0,624	0,916	0,791
Cromo	Cr	Mg/l	0,05	0,05	< 0,03				
Estaño	Sn	Mg/l	2	2	< 0,5				
Hierro	Fe	Mg/l	0,3	1	283,770	12,120	6,820	8,520	0,190
Manganeso	Mn	Mg/l	0,5	1	47,693			14,7	14,927
Níquel	Ni	Mg/l	0,05	0,5	0,630				
Plomo	Pb	Mg/l	0,05	0,1	0,190			< 0,03	
Zinc	Zn	Mg/l	0,2	5	74,938	36,323	26,681	35,149	41,730
Sulfatos	SO_4	Mg/l	300	400		552,9	859,7	756,500	892,000
Sulfuros	S^{2-}	Mg/l	0,1	1		< 0,001	0,001	0,012	
Calcio	Ca	Mg/l	200	400					190,24
Fósforo total	PT	Mg/l							
Magnesio	Mg	Mg/l	100	150					
Mercurio	Hg	Mg/l	0,001	0,001					
Nitrógeno total	NT	Mg/l	5	12					11
Potasio	K	Mg/l							33,94

* Demanda química de oxígeno
Fuente: Thuska Uma, 2009, con datos de Spectrolab

El comportamiento del cadmio, hierro, zinc, sulfatos y sulfuros en la lamela de sedimentación es similar, pero no ocurre lo mismo en las descargas del agua residual al dique de colas. Pero todas las concentraciones se encuentran muy por encima de los valores máximos permitidos por ley. Hay que destacar, no obstante, que las concentraciones disminuyen de manera significativa las descargas desde las lamelas.

3.2. Comportamiento de los diferentes parámetros con aguas tratadas en la planta piloto del ingenio de Machacamarca

Se tiene información de cinco muestras de aguas tratadas en diferentes épocas, lo que permite tener una idea más cabal del trabajo del compost y deducir su comportamiento. Además, se hace una comparación con los límites permisibles para aguas de clase "B" y clase "D" establecidos en el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica de la Ley de Medio Ambiente.

Cuadro 41
Parámetros de comportamiento de diferentes elementos en aguas tratadas con método pasivo

Parámetros	Símbolo	Unidades	Aguas clase "B"	Aguas clase "D"	Agua en el IM a 24 horas (20/07/09)	Agua en el IM al mes (14/08/09)	Aguas d/t aerebio (24/09/09)	Aguas d/t anaerebio (22/10/09)	Aguas d/t (08/12/09)
					TC	TC	TC	TC-F	AT - F
pH			6	9					
Sólidos susp.		mg/l			104				
Turbidez		NTU	10	200					
DQO*		mg/l	50	60					
Acidez		mg/l							
Alcalinidad		mg/l							
Antimonio	Sb	mg/l	0,01	0,01					
Arsénico	As	mg/l	0,05	0,1					
Cadmio	Cd	mg/l	0,005	0,005	0,060	0,034	0,012	0,024	< 0,002
Cromo	Cr	mg/l	0,05	0,05					
Estaño	Sn	mg/l	2	2					
Hierro	Fe	mg/l	0,3	1	0,250	3,110	2,790	0,780	0,220
Manganeso	Mn	mg/l	0,5	1		12,96	19,401	16,703	16,803
Níquel	Ni	mg/l	0,05	0,5					
Plomo	Pb	mg/l	0,05	0,1		< 0,03	< 0,1	< 0,1	
Zinc	Zn	mg/l	0,2	5	0,476	2,873	0,430	0,260	0,330
Sulfatos	SO4	mg/l	300	400	1389,6	826,300	713,4	665,000	639,100
Sulfuros	S	mg/l	0,1	1	0,013	1,601			
Calcio	Ca	mg/l	200	400					368,24
Fósforo total	PT	mg/l							
Magnesio	Mg	mg/l	100	150					
Mercurio	Hg	mg/l	0,001	0,001			< 0,001		
Nitrógeno total	NT	mg/l	5	12			13	11	13
Potasio	K	mg/l							41,24

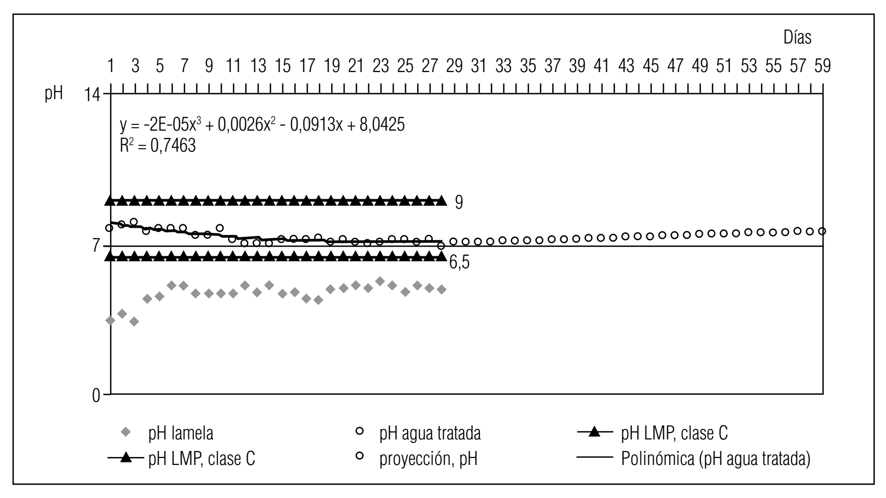
* Demanda química de oxígeno
Fuente: Thuska Uma 2009, con datos de Spectrolab

El comportamiento de cada elemento fue similar, con excepción del manganeso, que no disminuyó sustancialmente a medida que pasaba el tiempo. Las demás concentraciones disminuyeron sustancialmente.

3.3. El pH

Los resultados de la medición del pH en las aguas tratadas en la planta piloto del ingenio de Machacamarca se observan en el siguiente gráfico.

Gráfico 31
Medición de pH en la entrada y salida de las aguas



Fuente: Thuska Uma 2009, con datos de Spectrolab

Al inicio, el valor del pH en el agua de la lamela (agua sin tratamiento) fue relativamente bajo (ácido), pero después de la primera semana tendía a neutralizarse. En el agua tratada, el valor del pH al inicio fue relativamente alto (alcalino), en los siguientes días se estabilizó permaneciendo dentro del rango de los límites permisibles.

3.4. Conductividad eléctrica (CE)

Los valores de la conductividad eléctrica en las aguas de entrada y salida variaron enormemente. La medición siguiente es resultado del primer mes del experimento.

Gráfico 32
Comportamiento de la CE del agua en la entrada y salida

Fuente: Thuska Uma 2009, con datos de Spectrolab

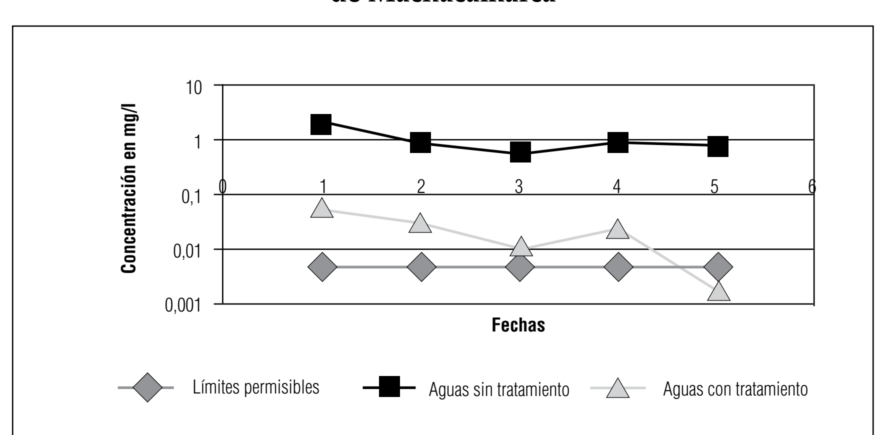
Los valores de la CE en la entrada fueron relativamente bajos, pero se observa una variación en el transcurso de los siguientes días, con dos mínimos locales. El valor de la CE del agua de salida al inicio fue alto, luego se estabilizó, por lo menos a partir del décimo día.

3.5. El cadmio (Cd)

Los elementos analizados hasta antes del 8 de diciembre de 2009 estaban en muchos casos por encima del límite permisible en aguas de clase “B” y “D”. Con el tratamiento, los distintos elementos se precipitaron, inclusive los sulfatos, aunque ligeramente seguían por encima de la norma boliviana para aguas de clase “D”. Sería interesante hacer un análisis minucioso de las concentraciones en los distintos elementos, tanto antes como después del tratamiento de las aguas, que se extendió por seis meses.

Un ejemplo de ese proceso es el comportamiento del cadmio antes y después del tratamiento de seis meses.

Gráfico 33
Análisis químico del cadmio en el agua del ingenio de Machacamarca



Fuente: Thuska Uma 2009, con datos de Spectrolab

En aguas sin tratamiento, las altas concentraciones de cadmio (en mg/l) estaban por encima de la norma boliviana. Cuando se hace tratamiento de aguas con compost, esos valores disminuyen drásticamente, pero no alcanzan a bajar por debajo de los límites permisibles. Hasta el último análisis, la concentración llegó debajo del límite permisible.

3.6. Análisis químico del compost

El compost elaborado de sustratos de estiércol de llama, estiércol de ovino y de residuos de cocina tiene restos de diversos elementos químicos y su concentración puede ser significativa. En el cuadro 42 se describen los valores de los distintos parámetros.

Cuadro 42
Análisis químico del compost

Parámetros	Símbolo	Unidades	Compost s/t (20/07/09)	Compost c/t (08/12/09)
			C-M	M-F
Materia orgánica		%	26,1	24,3
Nitrógeno total	NT	%	0,7	0,35
Sulfuros	S^-	mg/kg	< 0,03	
Sulfatos	SO_4	mg/kg	5150	3
Cadmio	Cd	mg/kg	0,400	0,400
Hierro	Fe	mg/kg	2,9	2,2
Zinc	Zn	mg/kg	12,460	7,310

Fuente: Thuska Uma 2009, con datos de Spectrolab

La concentración más elevada fue de sulfatos, luego estaba el zinc; el hierro disminuyó sustancialmente, en menor cantidad el cadmio (de todas maneras en una disminución significativa) y el nitrógeno. Mientras que la materia orgánica era relativamente alta.

Después de seis meses de tratamiento, el sulfato disminuyó radicalmente, pero también la materia orgánica, el nitrógeno, el hierro y el zinc. El cadmio no varió su concentración, ni antes ni después.

4. Método activo

4.1. Caracterización físico-química del agua a tratar

El agua del ingenio de Machacamarca, tratada inicialmente por el método pasivo, se caracterizó por aspectos físicos y químicos sobre la base de parámetros que se detallan en los cuadros 43 y 44, que orientan su aplicación a la operación de ósmosis inversa.

Cuadro 43
Valores de los parámetros agua tratada

Parámetro	Forma de medición	Valor	Unidad
Conductividad	Conductivímetro	6,637	Microsiems (µS)
pH	pHmetro	6,45	
Turbidez	Turbidímetro HACH	34	NTU
Tasa de sedimentación	Filtración y evaporación	2.250	mg/l
Densidad	Picnómetro	1.079,2	kg/cm^3
Viscosidad	Viscosímetro tipo caída de la esfera	1.286×10^{-3}	kg/m x s

Fuente: Thuska Uma 2009

En el cuadro que sigue se muestra los valores de los parámetros que cumplen con las condiciones de alimentación establecidas para la ósmosis inversa. El análisis químico realizado por Spectrolab proporcionó los siguientes resultados:

Cuadro 44
Análisis químico para la alimentación de ósmosis inversa

Elemento	Sb	As	Cd	Fe	Mn	Pb	Zn
Parte por millón	<0,002	0,007	0,03	1,73	9,431	<1,00	1,02

Fuente: Thuska Uma 2009

4.2. Pruebas preliminares

Para demostrar las características de la membrana a utilizarse en la ósmosis inversa se realizó apropiadas pruebas experimentales, para las cuales se utilizó dispositivos independientes al equipo de ósmosis inversa, como los que se describen a continuación:

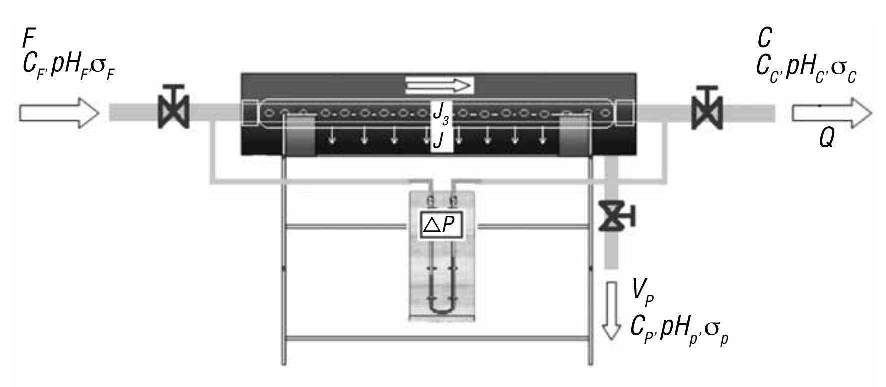
1. Para las *pruebas de semipermeabilidad y de tiempo de vida útil* de la membrana se construyó un dispositivo similar al osmómetro. Constaba de una probeta de plástico de dos pulgadas de diámetro con un orificio lateral a los veinticinco centímetros de la base para la salida del permeado; un tubo de plástico de 5/8 de pulgada de diámetro con perforaciones en uno de sus extremos a los veinticinco centímetros de altura, lugar donde la membrana estaba asegurada adecuadamente, ya que el tubo perforado le servía de soporte; el resto del tubo era una columna de un metro de alto. Este tubo se sumergió en la probeta y una vez instalado se llenó hasta el tope con el agua residual a tratar, lo que representa la presión hidrostática que se aplica al sistema (mayor a la presión osmótica de la solución) para que se invierta el flujo desde dentro de la membrana hacia fuera. Finalmente se llenó de agua la probeta, hasta el orificio lateral. El flujo de agua permeada salía por el orificio de la probeta debido a la elevación del nivel del agua y se recogía en una probeta graduada que permitía medir el volumen del permeado.

Figura 11
Equipo para prueba de semipermeabilidad

Fuente: Thuska Uma 2009

2. El *dispositivo para las pruebas de resistencia* consiste en dos tubos concéntricos dispuestos horizontalmente. El tubo interior (con perforaciones practicadas longitudinalmente) sostiene la membrana, y el tubo exterior, de mayor diámetro, recibe el agua filtrada; éste presenta un corte longitudinal por encima de su centro para que pueda observarse la operación y se manipule la membrana con facilidad; por un ducto de salida provisto por una llave se recoge el filtrado que debe ser analizado. Una bomba centrífuga provee el fluido a tratar y se ajusta la presión regulando las válvulas tanto de la alimentación, a través de la membrana, como de la salida.

Figura 12
Equipo para prueba de resistencia



Fuente: Thuska Uma 2009

3. Para las pruebas de *selectividad y productividad* se trabaja con el equipo diseñado de ósmosis inversa.

4.3. Resistencia de la membrana

La presión aplicada es un factor muy importante para conocer la capacidad de resistencia de la membrana. Para ello se realizaron pruebas a distintas presiones. Asimismo, se determinó el límite máximo en el cual la membrana se perfora o se rompe. Se utilizó el equipo descrito en la figura 12.

El agua residual fluye bajo presión relativamente elevada a través de la membrana, proyectada para soportar la presión adecuada, y empieza a penetrar agua hacia el exterior. La expulsión de la solución concentrada se realiza a través de una válvula de control que hace posible el mantenimiento de la presión deseada en el interior de la instalación, se controla también la corriente de alimentación para impedir una sobrepresión o un flujo insuficiente de agua.

Cuadro 45
Resultados de la prueba de resistencia de la membrana

Nº de prueba	Presión de mercurio (mm Hg)	Caudal (ml/s)	D (cm)	Vol. permeado en una hora (ml)	Conductividad microsiems (µS)	
					Alimentación	Producto
1	30	68.275	2,07	248	6.637	4.749
2	35	74.561	2,08	272	6.637	4.778
3	40	79.667	2,10	284	6.637	6.113
4	45	88.189	2,13	308	6.637	5.998
5	50	93.247	2,15	360	6.637	4.275
6	55	100.164	2,15	580	6.637	6.716
7	60	106.733	2,15	700	6.637	6.728

Fuente: Thuska Uma 2009

Los resultados que muestra este cuadro, permiten establecer que en las pruebas 1 y 2 hay un bajo caudal e infiere en una presión también baja, por lo que el volumen de permeado es mínimo. Pero se pueden observar buenos resultados al comparar las conductividades de la solución de alimentación y permeado.

En las pruebas 3 y 4, con flujos de agua un poco más elevados, se obtuvo resultados regulares, ya que los valores de las conductividades de la alimentación y el producto se asemejan, lo que indica un bajo rendimiento.

En la prueba 5 se obtuvo resultados convincentes, por lo que se puede concluir que el caudal empleado y la presión que imparte son adecuados.

En las pruebas 6 y 7 se observó que la conductividad del producto presenta un valor mayor al valor de la conductividad de la alimentación, resultado erróneo que se debe a que el caudal aplicado es muy elevado, por lo tanto la presión que se proporcionó a la membrana no es correcta, ya que hace que sus poros se abran más de lo debido y dejen pasar gran cantidad de partículas de soluto además del disolvente.

En conclusión, la mínima presión a aplicar es de treinta milímetros de mercurio (30 mm Hg), ya que a presiones inferiores la membrana

no llegó a hincharse y la máxima presión que soporta corresponde a un valor de sesenta milímetros de mercurio (60 mm Hg); a una presión mayor la tripa se perfora y revienta. Finalmente, se establece como presión de trabajo los cincuenta milímetros de mercurio (50 mm Hg), debido a que con esta presión se obtuvo los resultados más satisfactorios.

4.4. Tiempo de vida útil de la membrana

La vida útil es la duración estimada que tiene la membrana al cumplir correctamente la función para la cual ha sido creada. Se calcula en horas de duración, pues la membrana debe producir un flujo constante de solvente en determinado tiempo de operación.

Para predecir el tiempo de vida útil de la membrana se realizó la siguiente experiencia: en el equipo, se llenó con agua la probeta hasta el orificio lateral que presenta y se midió cada hora el volumen de permeado y la conductividad. Se realizó la misma acción durante quince horas, trabajando con la misma membrana.

Se obtuvo los resultados que figuran en el siguiente cuadro.

Cuadro 46
Resultados de la prueba de tiempo de vida útil de la membrana

Nº prueba	Tiempo (horas)	Volumen permeado (ml)	Conductividad en microsiems (µS)
1	1	252	3.458
2	2	248	3.659
3	3	249	3.815
4	4	244	3.832
5	5	246	3.848
6	6	239	3.693
7	7	235	3.995
8	8	237	4.016
9	9	226	4.112
10	10	220	4.098
11	11	186	4.477
12	12	180	4.576
13	13	163	4.660
14	14	129	4.726
15	15	110	4.718

Fuente: Thuska Uma 2009

Los síntomas principales para detectar el desgaste de la membrana se notan principalmente comprobando que prueba tras prueba, la operación de ósmosis inversa proporciona menos agua tratada y no tiene la misma calidad; es decir, disminuye el volumen de permeado y la conductividad de éste es mayor. He aquí una representación gráfica de las pruebas:

Gráfico 34
Tiempo de vida útil de la membrana

Fuente: Thuska Uma 2009

El tiempo de vida útil de la membrana es de aproximadamente ocho horas, de acuerdo a los datos registrados en el cuadro 46 y los resultados del gráfico 34.

En este gráfico se observa que a partir de las ocho horas de operación, el volumen de permeado rebaja considerablemente en comparación con horas anteriores, donde la disminución en volumen es en promedio de 4 ml. En cambio, desde las nueve horas de operación, el volumen de permeado disminuye en más de 15 ml por cada hora que transcurre.

4.5. Consideraciones de diseño del equipo de ósmosis inversa

El equipo está formado por un paquete de tubos porosos y huecos, internamente dispuestos; cada uno de ellos trabaja con una membrana. La cantidad de tubos que caben en el interior del módulo permite aumentar la superficie para un mismo espacio ocupado, por lo que el

sistema está construido de forma compacta, colocando los tubos en serie o paralelamente dentro del módulo, de manera que se consiga una gran superficie de membrana en el mínimo volumen posible (véase http://www.lenntech.com/espanol/Tecnologia-de-membranas.htm).

El módulo tubular es la configuración más simple en que la membrana se moldea sobre la pared de un tubo soporte, poroso. Como la membrana tiene poca fuerza mecánica y debido a la presión requerida para el flujo de agua, debe tener un soporte para prevenir descompostura. De esta manera, la membrana tiene una película muy fina, soportada por una capa subyacente más espesa y porosa. La capa pelicular es la responsable de las funciones de la membrana y la capa porosa está presente sólo como soporte.

Una bomba centrífuga provee en forma continua el fluido a tratar y además, es la encargada de suministrar la presión necesaria para producir la operación. Se implementa un manómetro en forma de U con mercurio como líquido manométrico, que mide la diferencia de presión del sistema. Asimismo, la instalación cuenta con válvulas reguladoras de las corrientes de alimentación, de concentrado y permeado, para mantener la presión y el caudal adecuados.

El material de construcción empleado debe ser anticorrosivo y es generalmente PVC para bajas presiones y para unidades a pequeña escala (según Lyonnaise des Eaux 1998).

El diseño del equipo de ósmosis inversa toma en cuenta las siguientes especificaciones: diámetro del tubo interior, caudal, diferencia de presión, longitud total del tubo, longitud efectiva, disposición de los tubos, número de tubos, diámetro de la coraza, relación diámetro/longitud.

4.6. Cálculos para el diseño del equipo de ósmosis inversa

En función de los datos, especificaciones y marco teórico relativo al diseño del equipo de ósmosis inversa, se procede al cálculo de la presión osmótica, la presión de trabajo, caudal, número de Reynolds, factor de fricción, longitud total del tubo, longitud efectiva, diámetro de la coraza y longitud de la coraza.

4.7. Dimensiones y construcción del equipo de ósmosis inversa

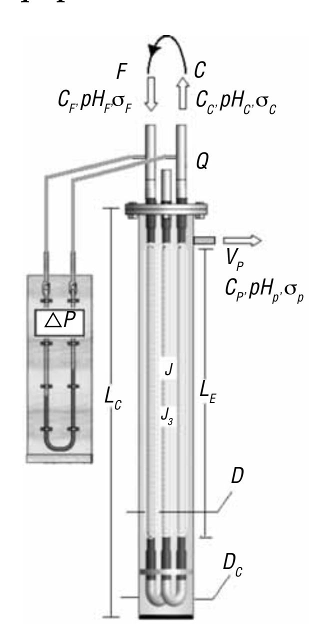
Las dimensiones del equipo de ósmosis inversa se detalla en el cuadro siguiente. Sobre esa base se ha construido el equipo con material adquirido en el mercado local (PVC), que se muestra en la figura 13.

Cuadro 47
Dimensiones del equipo de ósmosis inversa

Símbolo	Descripción	Unidad	Valor
Q	Caudal de diseño	L s	0,093
ΔP	Caída de presión	mmHg	50
D	Diámetro de la membrana	m	0,0215
L	Longitud total del tubo	m	3,0
L_E	Longitud efectiva	m	0,55
D_C	Diámetro de la coraza	m	0,10
L_C	Longitud de la coraza	m	0,75

Fuente: Thuska Uma 2009

Figura 13
Equipo de ósmosis inversa



Fuente: Thuska Uma 2009

Por la configuración de la membrana, el equipo de ósmosis inversa consiste en un módulo tubular. Está formado por un paquete de cuatro tubos porosos y huecos, dispuestos en serie y en arreglo de cuadro rotado en el interior de una coraza; cada tubo trabaja con una membrana. El diámetro del equipo es de diez centímetros y su longitud de 75 centímetros; el diámetro de cada membrana alcanza a 2,15 centímetros y su longitud es de 55 centímetros.

4.8. Evaluación experimental del equipo de ósmosis inversa

Construido el equipo, corresponde realizar la evaluación experimental de su productividad, su selectividad, así como contrastar los componentes del análisis químico, antes y después del tratamiento, y finalmente la representación del comportamiento de variables representativas, tomando en cuenta el siguiente procedimiento:

- Se coloca las membranas sobre cada tubo soporte del mazo y se ajustan adecuadamente en los extremos.
- Se introduce el mazo de membranas dentro de la coraza y se cierra herméticamente.
- Se monta el equipo adecuadamente, acoplando las mangueras correspondientes a las corrientes de alimentación, concentrado y permeado, y también las ramas del manómetro en U a los extremos del tubo.
- Se llena la coraza con agua pura, la cual se ocupará de recibir el permeado.
- Se vierte el agua a tratar al tanque de alimentación y se hace funcionar la bomba que suministra dicho fluido al sistema de ósmosis inversa.
- Se regula las válvulas de alimentación y concentrado, obteniendo el caudal y la presión que se requiere para efectuar la operación, verificando con el manómetro el valor de la diferencia de presión a través de la membrana.
- Se deja trabajando al equipo durante una hora y se recoge el permeado, mientras el concentrado recircula continuamente.
- Durante la operación se registran los datos necesarios.

4.9. Resultados del análisis químico

Para comprobar que el proceso se llevó a cabo apropiadamente, una vez tratada el agua en el equipo de ósmosis inversa, se llevó el producto al laboratorio químico Spectrolab y se comparó los resultados obtenidos con los que se halló en la alimentación. También se analizó los resultados tomando en cuenta los límites permisibles para descargas de agua.

Cuadro 48
Comparación de resultados con tratamiento de ósmosis inversa

	Alimentación	Producto	Límite permisible aguas clase "A"	Límite permisible aguas clase "B"
pH	6,45	6,91	6,0 - 9,5	5,5 - 9,5
σ	6,637 mS	3,368 mS	0,5 - 2 mS	0,5 - 2 mS
Sb	0,002 ppm	0,002 ppm	0 ppm	0,01 ppm
As	0,007 ppm	0,003 ppm	0,05 ppm	0,05 ppm
Cd	0,03 ppm	0,03 ppm	0,05 ppm	0,2 ppm
Fe	1,73 ppm	0,02 ppm	1,0 ppm	2,0 ppm
Mn	9,431 ppm	1,151 ppm	1,0 ppm	2,0 ppm
Pb	1,00 ppm	1,00 ppm	0,1 ppm	0,01 ppm
Zn	1,02 ppm	0,06 ppm	10,0 ppm	15,0 ppm

mS: milisiems; ppm: partes por millón
Fuente: Thuska Uma 2009

Con este procedimiento se logró aminorar en cantidad considerable los contaminantes presentes en el agua residual, principalmente hierro, manganeso y zinc. La conductividad disminuyó de 6,637 milisiems (mS)a 3,368 milisiems (mS), la turbidez de 36 NTU (unidades nefelométricas de turbidez) a 18 NTU y el pH se elevó de 6,45 a 6,91. El agua tratada mediante ósmosis inversa podría haberse encontrado dentro de los límites permisibles para aguas de clase "A" (después del proceso de sedimentación, filtración y desinfección), aptas para el riego de vegetales y la natación, excepto por la presencia de manganeso y plomo. Por otra parte, la conductividad del agua excedió los límites permisibles, esto significa que todavía contenía sólidos disueltos y algunos contaminantes iónicos; por lo que este tipo de agua (con excesiva cantidad de iones metálicos) no es apta para el consumo humano, pero puede utilizarse para la preservación de la flora, fauna y como bebedero de animales, características de las aguas de clase "B".

Capítulo VII

Resultados en cultivos hidropónicos

Para establecer la ecotoxicidad de las aguas tratadas mediante ósmosis inversa se trabajó en dos aspectos: pruebas ecotoxicológicas y cultivo de cebada forrajera en invernaderos.

La especie a la que se realizó las pruebas ecotoxicológicas fue la cebada. Se la regó con dos tipos de agua: agua tratada en soluciones al 25%, 50% y 75% y agua sin tratamiento también en soluciones de 25%, 50% y 75%.

Para interpretar la calidad del agua para riego se usó los criterios propuestos por Ayers y Tnaji (1981), que se basan en dos aspectos muy importantes: la relación de absorción de sodio (RAS) y la conductividad eléctrica (CE).

Los mencionados autores realizan una combinación de RAS y CE para clasificar las aguas con fines de riego, según se muestra en el siguiente cuadro.

Cuadro 49
Criterios de interpretación de la calidad del agua para riego

RAS meq/l	CE, dS/m*		
	Sin problema	Ligero a moderado	Grave
0 a 3	> 0,9	0,9 a 0,2	< 0,2
3 a 6	> 1,3	1,3 a 0,25	< 0,25
6 a 12	> 2	2 a 0,35	< 0,35
12 a 20	> 3,1	3,1 a 0,9	< 0,9
> 20	> 5,6	5,6 a 1,8	< 1,8

*dS/m: decisiems por metro
Fuente: Ayers y Tnaji 1981, modificado por L. Pérez 2008

Si se realiza una comparación, el agua tratada se encuentra dentro de los parámetros de agua para riego y el agua sedimentada no cumple con esos criterios de selección, ya sea por su elevada salinidad o por una elevada absorción de sodio.

1. Macro y micronutrientes

La planta no está constituida solamente de agua, como pensaba Van Helmont, aunque contiene grandes cantidades de dicho compuesto; posee también una pequeña fracción de sustancias minerales y orgánicas necesarias para el crecimiento de la planta.

Un elemento químico puede ser *esencial*, ya que sin él la planta no vive; *benéfico*, ya que aumenta el crecimiento y la producción en situaciones particulares (por ejemplo el silicio para la cebada), o *tóxico*, que no pertenece a las categorías anteriores, debido a que disminuye el crecimiento y la producción pudiendo llevar a la muerte de la planta.

Los macronutrientes son aquellos elementos, como el nitrógeno, fósforo, potasio, azufre y calcio, que son esenciales para el desarrollo de las plantas. Las deficiencias provocarían clorosis, necrosis y otras características propias de cada especie. Además hay otros tres elementos esenciales que provienen del agua y del aire: el carbono, el hidrógeno y el oxígeno (C, H y O).

Consideramos micronutrientes a los elementos esenciales cuya concentración en un vegetal es menor a 0,1 % en peso seco. Se considera micronutrientes a los siguientes elementos: hierro, manganeso, zinc, cobre, boro, molibdeno, cloro y níquel.

Los micronutrientes presentan dos características generales que los diferencian de los macronutrientes:

1. La magnitud de las concentraciones de micronutrientes en los tejidos vegetales es significativamente inferior a la de los macronutrientes.

2. Los micronutrientes no participan en procesos que dependen

de concentración, como los osmóticos, el pH, el antagonismo catiónico. Una excepción es el cloro, que puede tener un papel osmótico. Tampoco suelen desempeñar funciones estructurales, a excepción del boro en la pared celular.

- Los micronutrientes metálicos (Fe, Mn, Zn, Cu, Mo, Ni) tienen algunas características en común:
- Son metales de transición, con el orbital 3d sin completar y en el caso del molibdeno el 4d, que pueden participar en la formación del enlace metálico y tienden a dar cationes en condiciones ambientales.

Son menos electropositivos que alcalinos y alcalinotérreos, aunque se comportan también como ácidos de Lewis (aceptan pares de electrones). Por tanto, pueden formar complejos con bases de Lewis o ligandos.

Las funciones de los micronutrientes metálicos en la planta son más bien metabólicas, participan de la regulación enzimática formando parte constitutiva de la enzima o actuando como coenzima, o en funciones redox. En concentraciones superiores a lo indicado se convierten en elementos tóxicos para las plantas, los animales y los seres humanos.

2. Resultados de laboratorio obtenidos en cebada con variables "longitud del vástago", "diámetro del vástago" y "longitud radicular"

Cuadro 50
Resumen de análisis de varianza para la especie cebada

Variable de respuesta	Tratamiento	Concentración	Tratamiento por concentración	%CV
Longitud vástago	0,0001 **	0,0001 **	0,0001 **	7,3
Diámetro vástago	0,0001 **	0,0001 **	0,0001 **	8,2
Longitud raíz	0,0001 **	0,0001 **	0,0001 **	12,7

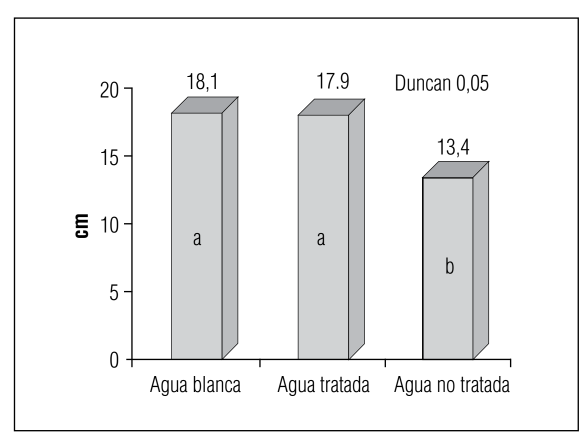
** altamente significativo
Fuente: Thuska Uma 2009

Las diferentes variables, una vez registradas en el proceso de desarrollo de la cebada, han sido analizadas en el paquete estadístico SAS (*System Analisis Service*), que nos permitió determinar si son significativas o no tienen significancia. Al 95 % de confianza estadística; para las variables "longitud del vástago", "diámetro del vástago" y "longitud de raíz", los tratamientos, las concentraciones y la interacción son altamente significativos. El coeficiente de variación para "longitud del vástago" es de 7,3; para "diámetro del vástago" es 8,2 y para "longitud de raíz" es 12,7, lo que nos indica que existe plena confiabilidad en los resultados obtenidos.

2.1. Longitud del vástago de cebada en centímetros (tratamientos)

En el gráfico 35 se compara medias para la variable "longitud del vástago" mediante el método estadístico Duncan, donde se tiene como resultado mayor 18,1 centímetros con agua tratada y 17,9 centímetros con agua de pila; lo cual nos indica que estadísticamente ambos tratamientos son similares. La diferencia se da con el agua no tratada, que logra 13,4 centímetros de longitud en vástago de cebada, medida diferente a las logradas por los otros tratamientos.

Gráfico 35
Comparación de medias de la variable "longitud del vástago" mediante tratamientos



Fuente: Thuska Uma 2009



Longitud del vástago
(TAC + 100 = agua tratada, TAS + 100 = agua contaminada o sedimentada).

En el desarrollo de longitud del vástago se cuenta con datos sobresalientes como el del agua blanca y el agua tratada, debido a que el agua de pila tiene un pH de 7,8 y el agua tratada un pH de 7,1, que se encuentran dentro de los rangos establecidos para el crecimiento del cultivo. El crecimiento se concentra en zonas específicas, llamadas *zonas de crecimiento* o de *alargamiento celular,* ya que inmediatamente de la zona meristemática se encuentra una región que raras veces tiene más de un milímetro; sólo existe alargamiento celular en una parte del proceso de crecimiento. El aumento de volumen de las células se puede explicar como el resultado de distensión de la pared celular a consecuencia de la presión de turgencia desarrollada en el interior de la célula.

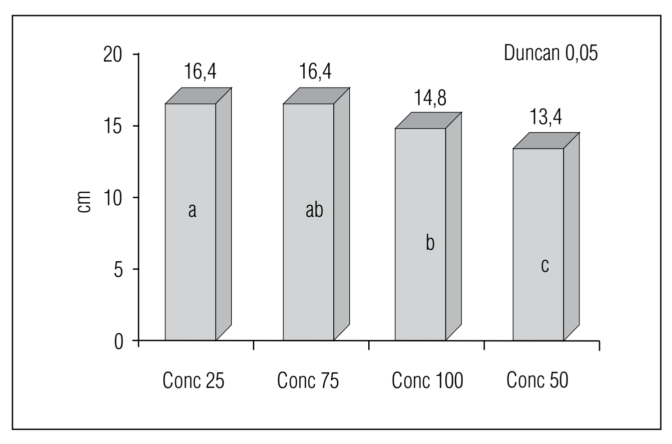
En cambio, el agua no tratada tiene un pH de 3,0 (ácido) que influye en el desarrollo de la altura de la planta. El agua no tratada contiene elementos tóxicos que inhiben ese crecimiento, genera un estrés biológico, la planta es afectada y no vuelve a su desarrollo normal.

2.2. Longitud del vástago de la cebada en centímetros (concentraciones)

En el gráfico 36 se muestra la longitud del vástago de cebada con diferentes porcentajes de concentración de aguas. Se compara

las medias mediante el método estadístico Duncan, y se tiene como resultado promedio mayor las concentraciones de 25% y 75%, y les sigue la concentración al 100%, lo cual indica que son estadísticamente son similares. Una clara diferencia presenta la concentración del 50%.

Gráfico 36
Comparación de medias de la variable "longitud del vástago" en concentraciones



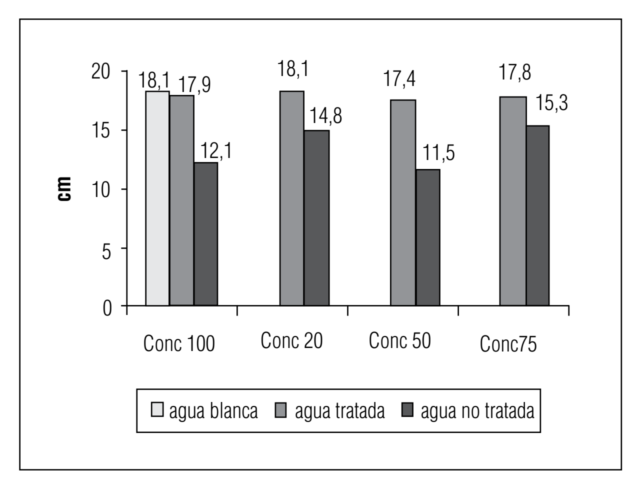
Fuente: Thuska Uma 2009

Para el desarrollo longitud del vástago se cuenta con datos similares aplicando concentraciones de 25% y 75%: 16,4 centímetros; con la concentración del 100% alcanzó un promedio de 14,8 centímetros. El promedio más bajo se registró aplicando la concentración del 50%, 13,4 centímetros, lo cual nos indica que estadísticamente es diferente a las demás concentraciones.

2.3. Longitud del vástago de la cebada en centímetros (tratamientos y concentraciones)

En el gráfico 37 se observa el comportamiento de longitud del vástago del cultivo de cebada con la aplicación de tres diferentes tipos de agua en diferentes concentraciones, que el análisis de varianza determinó como interacción altamente significativa.

Gráfico 37
Comparación de medias de la variable "longitud del vástago" con tratamiento por concentraciones



Fuente: Thuska Uma 2009

La interacción de las diferentes concentraciones de aguas (agua de pila, agua tratada y agua contaminada) aplicada en el cultivo de cebada tiene diferencias significativas; es decir que el comportamiento de discriminación para la variable longitud del vástago es diferente para cada concentración. Es evidente que la longitud del vástago depende del tipo de agua con que se riegue y las diferentes concentraciones que se aplique, ya que la dosis hace al veneno. La fórmula Dl_{50} es una forma de expresar el grado de toxicidad de las diferentes concentraciones; se expresa como la dosis aplicada en el cultivo de cebada. Una concentración puede matar la planta o afectar a su desarrollo, o puede lograr el desarrollo óptimo de la planta.



Longitud del vástago
(TAC + 25%, 50%, 75% y 100% y TAC + agua tratada).



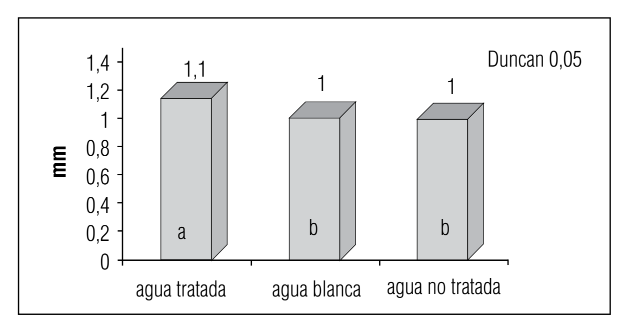
Longitud del vástago
(TAS +25%, 50%, 75% y 100 % y TAS + agua no tratada o contaminada).

En las fotos precedentes se observa los crecimientos en altura planta (longitud del vástago), para lo cual se aplicó diferentes concentraciones de agua de los tres tipos de tratamiento. Se presenta mayor altura de planta con los tratamientos de agua blanca y agua tratada, en longitudes superiores a los diecisiete centímetros, debido a que las soluciones no contienen elementos tóxicos y permiten que se realice la multiplicación vegetativa o mitosis de la célula. En cambio, con el agua contaminada, la división celular se inhibe.

2.4. Diámetro del vástago de la cebada en milímetros (tratamientos)

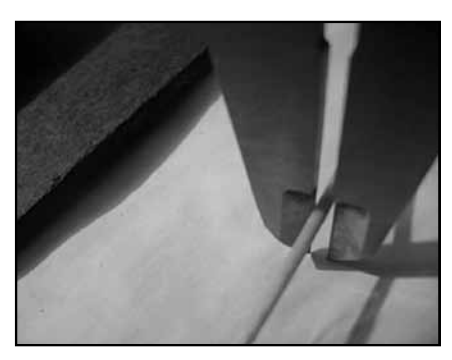
El análisis de varianza en el gráfico siguiente nos indica diferencias altamente significativas (pues el método estadístico Duncan tiene un 99% de confiabilidad). El agua tratada logró un mayor diámetro del vástago con respecto al agua de pila y el agua no tratada.

Gráfico 38
Comparación de medias de la variable "diámetro del vástago" con tratamientos



Fuente: Thuska Uma 2009

Con la aplicación de tres diferentes tipos de agua se tiene como resultado mayor en diámetro del vástago la aplicación de agua tratada, con un valor de 1,1 milímetro, y las aguas blanca y contaminada presentan valor de un milímetro, lo que estadísticamente hace similares a los tratamientos.



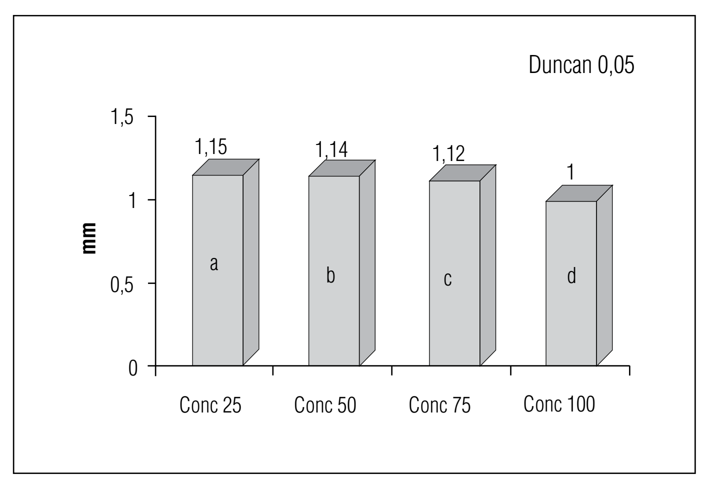
Medición del diámetro del vástago con un calibrador digital.

En la foto anterior se observa la medición de diámetro del vástago con la ayuda de un calibrador digital, donde se tiene mayor diámetro del vástago con la aplicación de agua tratada, lo que nos indica que a mayor longitud del vástago mayor es el diámetro de la planta.

2.5. Diámetro del vástago de la cebada en milímetros (concentraciones)

En el gráfico 39, siempre según el método estadístico de Duncan, se observa que el crecimiento del diámetro del vástago de cebada con la concentración de 25% es de 1,15 milímetros; la concentración de 50% logró un promedio de 1,14 milímetros; las concentraciones de 75%, 50% y 100% muestran valores inferiores en comparación con las otras, lo cual nos indica que estadísticamente las concentraciones aplicadas son diferentes.

Gráfico 39
Comparación de medias de la variable "diámetro del vástago" en concentraciones



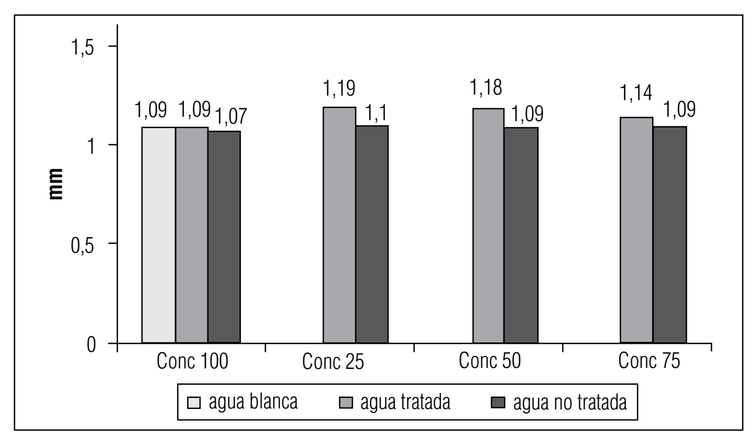
Fuente: Thuska Uma 2009

La concentración que ha logrado un mayor desarrollo de diámetro del vástago es la aplicación de 25%, pero no está muy lejos de la concentración de 50%; la concentración que logró menor desarrollo de diámetro del vástago es la de 100%: un milímetro.

2.6. Diámetro del vástago de la cebada en milímetros (tratamientos y concentraciones)

En el gráfico 40 se puede observar que las aguas tratadas en concentraciones de 25% y 50% lograron mayor desarrollo del diámetro del vástago. En cambio el agua no tratada muestra valores inferiores debido a que contiene elementos tóxicos: no sólo el diámetro sino la altura de la planta es menor.

Gráfico 40
Comparación de medias de la variable "diámetro del vástago" en tratamiento por concentraciones



Fuente: Thuska Uma 2009

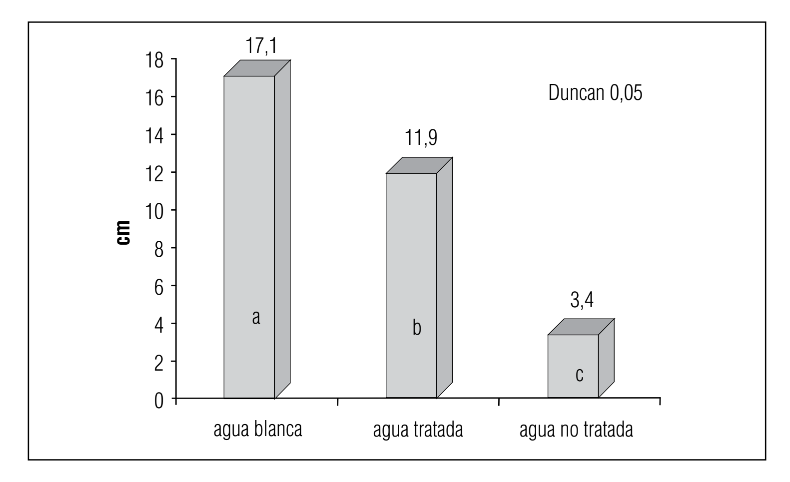
El mejor desarrollo de diámetro del vástago se logró con agua tratada en una concentración de 25% y 50 %: con 1,19 y 1,18 milímetros de diámetro, respectivamente. La concentración de 75% logró un diámetro de 1,14 milímetros. Para las concentraciones del 100%, el agua tratada muestra un valor similar al agua de pila: 1,09 milímetros en el diámetro del vástago. El agua contaminada presenta el menor diámetro: 1,07 milímetros.

2.7. Longitud de la raíz de la cebada en centímetros (tratamientos)

También se obtuvo estos resultados con el método Duncan. Mejores resultados se obtuvo con aplicación de agua de pila, luego

con agua tratada y por último con agua contaminada, que mostró un valor bastante reducido en el desarrollo de longitud de la raíz debido a su alta toxicidad: la planta no absorbe bien el agua y esto influye notablemente en su desarrollo radicular. Estadísticamente, los tratamientos muestran diferencias.

Gráfico 41
Comparación de medias de la variable "longitud de raíz" con tratamientos



Fuente: Thuska Uma 2009

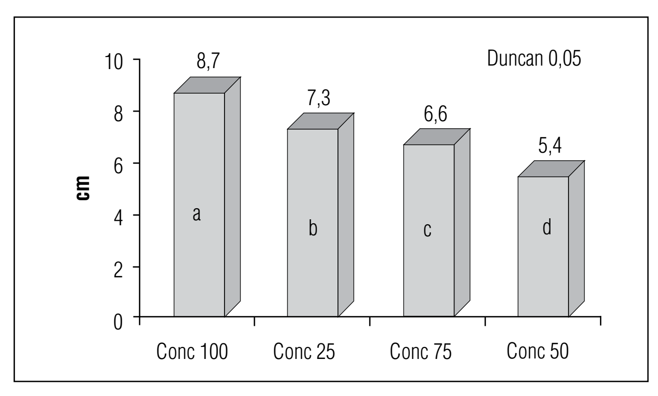
Un mejor promedio de longitud de la raíz se consiguió con la aplicación de agua blanca: 17,1 centímetros de crecimiento; el agua tratada logró un promedio de 11,9 centímetros y el agua contaminada logró 3,4 centímetros. Esta agua, que tiene un pH de 3,0 y una conductividad eléctrica de 2590 μS/cm perjudica más bien el normal desarrollo de la raíz, por tanto las células apicales no presentan un desarrollo óptimo, pues los meritemos apicales de la raíz producen células no sólo en el eje sino también hacia afuera para formar la cofia.

En el desarrollo de longitud del vástago se cuenta con datos sobresalientes con el agua de pila y el agua tratada, debido a que el agua de pila tiene un pH de 7,8 y el agua tratada un pH de 7,1, lo cual se encuentra dentro de los rangos establecidos para su producción. En cambio, el agua no tratada tiene un pH de 3,0; es agua ácida que influye durante el desarrollo de longitud de la raíz .

2.8. Longitud de raíz de cebada en centímetros (concentraciones)

En el gráfico 42 se muestra los resultados en el desarrollo de longitud de la raíz con la aplicación de diferentes concentraciones. El mejor resultado se alcanzó con la aplicación de la concentración al 100%, le siguen las concentraciones al 25%, 75% y finalmente 50%. Las aplicaciones generaron datos estadísticos diferentes.

Gráfico 42
Comparación de medias de la variable "longitud de raíz" en concentraciones



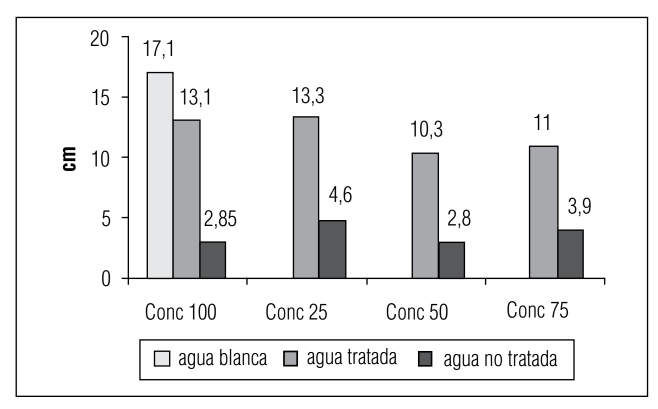
Fuente: Thuska Uma 2009

La mejor concentración resultó la del 100%, que logró hacer crecer la raíz hasta 8,7 centímetros; la concentración al 25% logró 7,3 centímetros de raíz; la concentración al 75% logró un desarrollo radicular de 6,6 centímetros, y la concentración al 50% logró 5,4 centímetros de longitud. Hay diferencia estadísticas entre concentraciones.

2.9. Longitud de raíz de cebada en centímetros (tratamientos y concentraciones)

En el gráfico 43 se observa un mejor comportamiento en el desarrollo radicular aplicando una concentración del 100% de agua blanca. Esta agua logró una longitud radicular de 17,1 centímetros; el agua tratada logró una raíz de 13,1 centímetros y el agua contaminada una raíz de 2,85 centímetros.

Gráfico 43
Comparación de medias de la variable "longitud de raíz" en concentraciones



Fuente: Thuska Uma 2009

La concentración al 25% (agua tratada) logró una longitud radicular de 13,3 centímetros; la concentración al 100% logró 13,1 centímetros. Estos dos tipos de agua contienen nutrientes; además las aguas tratadas reducen los elementos tóxicos y la acidez que contiene el agua sedimentada. Con el agua contaminada, la planta logra desarrollarse de alguna manera pero sólo presenta una longitud radicular de 2,85 centímetros, lo cual no favorece su desarrollo.

2.10. Un análisis de correlación

Cuadro 51
Correlación entre las variables de "longitud del vástago", "diámetro del vástago" y "longitud de raíz"

Variable de respuesta	Longitud vástago (cm)	Diámetro vástago (mm)	Longitud raíz (cm)
Longitud vástago	1,000	+0,30175 <0,0001 **	+0,7189 <0,0001 **
Diámetro vástago	+0,30175 <0,0001 **	1,000	+0.33003 <0,0001 **
Longitud raíz	+0,7189 <0,0001 **	+0,33003 <0,0001 **	1,000

** Altamente significativo
Fuente: Thuska Uma 2009

En la longitud del vástago se observa que existe correlación positiva (+0,30175 <0,0001) al 0,0001, 99 % de confiabilidad estadística con el diámetro del vástago, lo que indica que a mayor longitud del vástago es mayor el diámetro del vástago. También hay una correlación positiva con la longitud de la raíz (+0,7189 <0,0001), lo que indica que a mayor longitud del vástago es mayor la longitud de la raíz .

En el diámetro del vástago se observa que existe correlación positiva con la longitud de raíz, lo que indica que a mayor diámetro del vástago es mayor la longitud de raíz.

3. Resultados del cultivo hidropónico (*Hordeum vulgare*)

Una vez realizada la siembra en las bandejas, se regó mediante el sistema de aspersión tres veces al día (a horas 8.00, 14.00 y 18.00) para evitar que las semillas pierdan humedad y que esto perjudique al desarrollo de la planta. La cebada no es una planta exigente en riego, ya que es un cultivo a secano (con agua de lluvia). Pero durante el proceso no sólo no se descuidó el riego sino también se atemperó el ambiente para evitar temperaturas extremas.



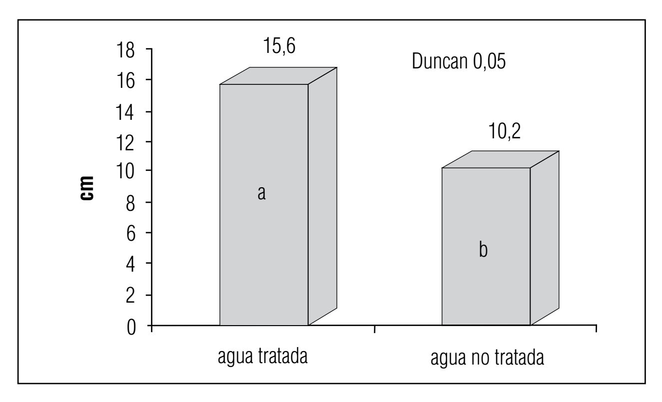
Riego por aspersión.

La investigación duró dos semanas, ya que el forraje verde hidropónico (FVH) se obtiene en ese tiempo y luego se lo da al animal.

3.1. Longitud de vástago de cebada en centímetros (con tratamientos)

Lo mismo que en el anterior experimento, se procesó los datos del experimento en forraje verde hidropónico con el paquete estadístico SAS utilizando el diseño estadístico al azar según el método Duncan. El agua tratada logró un promedio de longitud de vástago de 15,6 centímetros y el agua no tratada una longitud de vástago de 10,2 centímetros. Los resultados estadísticos son diferentes entre ambos tratamientos.

Gráfico 44
Comparación de medias de la variable "longitud de vástago" con tratamientos

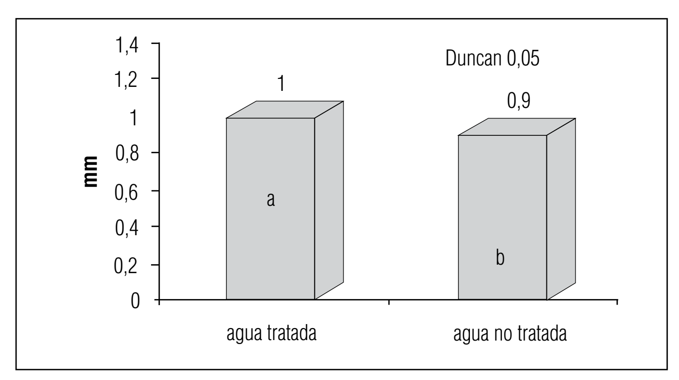


Fuente: Thuska Uma 2009

3.2. Diámetro de vástago de cebada en milímetros (con tratamientos)

Se obtuvo un promedio mayor de diámetro de vástago con el riego de agua tratada, pues tiene pH neutro y conductividad eléctrica baja, lo cual indica que es agua apta para riego (agua de clase "B"), a partir del Método Duncan. No interrumpe la división celular de la planta; en cambio los elementos tóxicos del agua no tratada influyen en su desarrollo. Las estadísticas son diferentes para ambos tratamientos.

Gráfico 45
Comparación de medias de la variable "diámetro del vástago" con tratamientos



Fuente: Thuska Uma 2009

En el gráfico 45 se muestra que el agua tratada obtuvo los mejores promedios de diámetro, un milímetro; el agua no tratada logró un promedio de 0,9 milímetros. Esto demuestra que la variable "diámetro del vástago" depende de la altura de la planta, lo que quiere decir que a mayor diámetro mayor es la longitud.

3.3. Rendimiento de materia verde

Para el cálculo de materia verde obtenida, se pesó el contenido de la producción, cuyo fin es servir de forraje al ganado vacuno. Los granos de cebada contienen nutrientes muy buenos para la digestión del ganado vacuno y para la consiguiente producción de leche. La materia verde lograda con la aplicación de agua tratada alcanzó un peso promedio mayor en comparación con la materia verde lograda con agua contaminada. Los datos son:

Gráfico 46
Comparación de pesos promedio en materia verde por gramo

	gr
Agua tratada	2063,05
Agua no tratada	2234,15

Fuente: Thuska Uma 2009

El agua tratada logró promedios bajos en peso debido a que no posee elementos tóxicos que hagan ganar peso a la planta.[10] En cambio, el agua contaminada logró más peso en la materia verde (atribuimos, provisionalmente, que esa situación se debe a la absorción de elementos tóxicos que hace la planta, lo cual influiría notablemente en su peso).

4. Resultados de cultivo hidropónico (*Lactuca sativa*)

El proyecto contempla la realización de cultivo hidropónico en hortalizas de hoja (lechuga *o Lactuca sativa*). Se cuenta con resultados promedio[11] de la aplicación de fertifol en diferentes concentraciones para obtener lechugas de excelente calidad. Como se ve en el gráfico, el agua no tratada logra una menor altura con una concentración de fertifol al 100%; en cambio el agua tratada aplicando una concentración de fertifol al 50% muestra un promedio de crecimiento de 8,3 centímetros. La aplicación de fertifol en una concentración al 25% logró resultados muy bajos.

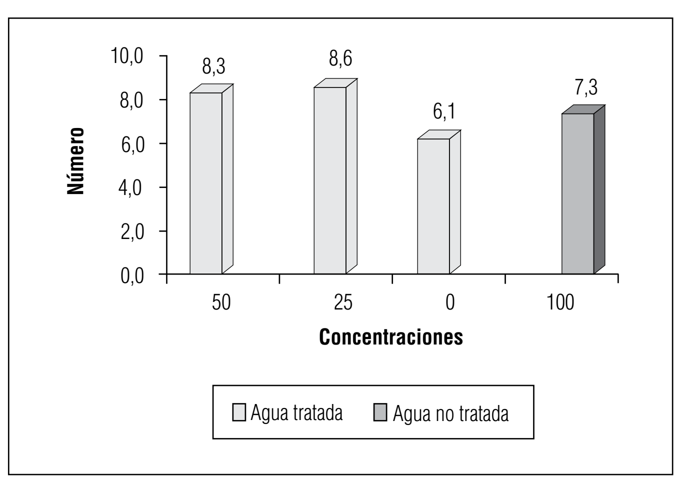
10 Falta aquí un dato que llegará con el resultado de análisis en laboratorio para determinar si la planta ha absorbido los elementos tóxicos o no y para determinar los elementos químicos presentes en ella.

11 Se determinó que la aplicación de fertifol no es necesaria ya que en agua tratada existen elementos necesarios para un normal desarrollo del cultivo.



Cultivo hidropónico en lechuga.

Gráfico 47
Aplicación de diferentes concentraciones de fertifol en lechuga



Fuente: Thuska Uma 2009

Como se puede apreciar, con la aplicación de fertifol recomendada al agua tratada, la lechuga no desarrolla debido a que ya existen los elementos necesarios para su desarrollo. Con este tratamiento, el agua se vuelve tóxica y al final inhibe el desarrollo de la planta.

Sin embargo, con una aplicación de 25% de fertifol, la lechuga presenta un desarrollo óptimo de 8,6 centímetros. Por tanto, no es bueno aplicar fertifol al agua tratada ya que contiene los elementos necesarios para la planta; además, con la aplicación de fertifol, la lechuga sólo desarrolla su tallo y no sus hojas, como debería de ser. Eso se debe a que la concentración obtenida causa un estrés a la lechuga, la división celular se inhibe y no se multiplican las células de la hoja. Este experimento nos sirvió para determinar la concentración apropiada para el desarrollo óptimo de la lechuga.

Conclusiones

- En lo referente a la parte social se estudió el análisis demográfico de la densidad poblacional, donde se observó un ámbito de desertización de la población, especialmente en las comunidades de Sora Sora, Toraca Alta y Alantañita Caravi, debido a que en la zona se presenta diversos factores que afectan –aunque no de manera directa– a la economía del comunero. La zona es afectada más por factores antrópicos, a esto se suma los factores climáticos, lo cual influye en la demografía poblacional.
- En cuanto al recurso hídrico, mediante el análisis de aguas y afluentes que se encuentran en el sector de evaluación, los cuales ingresan al ingenio de Machacamarca, se puede observar que el pH del agua presenta un rango de 3,5 a 4,5, lo que la clasifica como agua ácida. Por tanto, se determinó que el agua que ingresa al ingenio y su alrededor ya presenta una contaminación, que se refleja en su grado de acidez.
- Otros elementos presentes, como el boro, cloruros, carbonatos y bicarbonatos, presentan parámetros dentro de los límites permisibles; pero con un riesgo de alterar estas cantidades se encuentra el aporte de metales pesados por los procesos del ingenio. Pese a presentar un pH ácido, las aguas del sector presentan un grado de salinidad alto determinado por el RAS y el PSI, los cuales son los mejores indicadores del grado de sodio intercambiable que se encuentra en el agua.
- De acuerdo a la evaluación de los sectores cercanos a las actividades mineras, se pudo evaluar que las comunidades más alejadas del río presentan un pH casi neutro. Este fenómeno

sucede porque las fuentes de agua de esta zona se encuentran más elevadas que las actividades mineras, por lo cual no se llegan a contaminar.

- La conductividad eléctrica presenta un rango que va de moderadamente salino a levemente salino, lo cual no indica riesgo alguno para el cultivo.
- De acuerdo a estas dos observaciones, podemos determinar que las aguas (afluentes, vertientes y otras) que se encuentran cerca del río y las actividades mineras presentan un riesgo alto de contaminación y pérdida de sus propiedades físicas y químicas. Poco a poco, las aguas van degradándose con el arrastre de minerales pesados que son utilizados en los procesos mineros. Por otra parte, podemos ver que las fuentes de agua de las diferentes comunidades que presentan una posición más elevada y están lejos del río y de las actividades mineras no presentan riesgo de contaminación por la minería. Pero no obstante, tenemos que mencionar que las actividades mineras sin un programa de control de la contaminación llegarán a hacer que las aguas contaminadas se infiltren en el suelo y lleguen a contaminar los acuíferos subterráneos de las diferentes zonas, por lo cual la contaminación, a la larga, llegará a las reservas de aguas subterráneas.
- En el caso del recurso suelo, se puede observar una gran degradación en sus propiedades físicas y químicas por el efecto del movimiento de aguas. La capilaridad, la permeabilidad, la adhesión y la cohesión son fenómenos que ayudan a que el agua transporte los minerales pesados y se lleguen a depositar en los poros del suelo, creando una reacción tanto química como física que degrada el suelo y logrando su total pérdida en estructura, textura y capacidad productiva.
- En la evaluación se observó muy detenidamente cómo el agua es el principal transportador de los elementos contaminantes y degradadores hacia el suelo. La zona que presenta mayor depósito de minerales fue el sector de Chaupi Ingenio, que está siendo afectado directamente por las aguas contaminadas del río, por lo cual se determinó que el suelo está expuesto a la calidad del agua que se utilice para riego.

- En las comunidades evaluadas se observa el mismo criterio que las aguas que no se encuentran contaminadas. Por tanto, el suelo no presenta una contaminación minera.
- Pero por otro lado, debemos decir que sí presentan un grado leve de salinidad que también puede degradar el suelo con mayores concentraciones; esto nos permite conocer que no sólo la minería degrada los suelos sino también el mal uso de los recursos.
- Es muy importante tomar en cuenta que el agua es una fuente de transporte de minerales que contaminan el suelo y las plantas por los efectos de la absorción de nutrientes y deposición de éstos en zonas específicas de la planta y en los poros del suelo, lo que directamente afecta a sus propiedades físicas y químicas. Por tanto, combatir la contaminación del agua nos ayudará a combatir la contaminación de los suelos.
- Con todos los parámetros estudiados se determinó que los sectores cercanos al río y a las actividades mineras son afectados directamente por la contaminación de sus afluentes de agua, lo cual conlleva a la contaminación y degradación de los suelos que son afectados en forma directa con la deposición de los minerales pesados en su estructura por efecto del movimiento del agua. Eso genera que los terrenos agrícolas productivos vayan disminuyendo cada día más por efecto de la degradación de los suelos. Por tanto, la contaminación minera afecta al recurso hídrico porque llega a definirse como un transportador de la contaminación a los suelos y a los seres vivos.
- En el caso de las comunidades cercanas a las actividades mineras, tenemos que tener muy presente que la contaminación minera afectará a futuro sus fuentes de aguas subterráneas y tendrá la tendencia de degradar los suelos productivos.
- En la zona de estudio se identificó la vulnerabilidad de comunidades vegetales, las cuales han sido comparadas con las diferentes formaciones vegetales. Se encontró que la formación vegetal 2 y 3 son las zonas más perturbadas y la biodiversidad de especies vegetales es bastante reducida en comparación con la formación vegetal 1.

- De acuerdo con los resultados obtenidos en la zona, en la formación vegetal 1 se tiene una baja perturbación; es decir, vulnerable a perturbaciones de menor escala debido a que en la zona hay especies anuales y bianuales. Presenta como respuesta el tipo de estrategia de vida R.
- En las formaciones vegetales 2 y 3, las comunidades vegetales se encuentran perturbadas (más vulnerables).
- En cuanto a la producción agrícola se tiene cultivos como cebada, alfalfa, quinua, papa, haba y otros que son para el consumo de los comuneros; su sistema de producción no presenta tecnología adecuada, además la zona se encuentra sometida a factores climáticos, antrópicos y factores naturales. Por tanto, sus productos son de baja calidad y con rendimiento bajos.
- La producción pecuaria es bastante rústica, sin tecnología en infraestructura ni tecnología necesaria para el acopio de leche; se tiene ganado vacuno y ovino. La producción ovina es para el autoconsumo y el ganado vacuno es ofertado en las ferias comunales o ferias de la ciudad.
- Una vez obtenida la "foto" de la situación ambiental y según los resultados obtenidos se realizó el tratamiento de aguas ácidas del ingenio de Machacamarca mediante el método pasivo. Para este sistema, en principio, se elaboró el compost, sistema que está basado en la reducción bacteriana de sulfatos, con una distribución importante de disolución de calcita.
- El uso de las bacterias del compost realizado muestra un buen funcionamiento en el retiro de agentes contaminadores del drenaje de ácido de la mina. Las reacciones químicas y biológicas ocurren en la célula, reduciendo así los agentes contaminadores.
- Los procesos aerobios y anaerobios pueden ser producidos, pero principalmente los procesos anaerobios tales como reducción del sulfato muestran un funcionamiento mejor en la reducción de acidez y de los metales pesados.
- Las aguas tratadas mediante el método pasivo lograron cambiar su pH ácido a un pH neutro que las hizo aptas para su

rehúso en riego. Estas aguas tratadas se utilizaron en pruebas ecotoxicológicas utilizando como herramienta el cultivo de cebada en laboratorio y en campo con cultivos hidropónicos con riego por sistema de aspersión. En ambas pruebas ecotoxicológicas, las variables de estudio, como "longitud del vástago", "diámetro del vástago" y "longitud de raíz", obtuvieron resultados óptimos con las aguas tratadas; en cambio con las aguas contaminadas la planta no logró un desarrollo óptimo debido a que la división celular de los meritemos apicales se inhibe, por tanto la planta no logra una producción óptima.

– Las aguas tratadas mediante el método pasivo se sometieron a tratamiento activo utilizando membranas orgánicas proveniente de tripa delgada de ovino, adecuada para la operación de ósmosis inversa, pues cumple con las siguientes características: desempeña la función de semipermeabilidad, ya que fue capaz de obtener flujo de disolvente y de rechazar iones y sales disueltas; resulta resistente a aguas ligeramente ácidas y presiones mayores a la presión osmótica de la solución. Por otra parte, se ha determinado que la membrana presenta un tiempo de vida útil bastante corto en comparación con las membranas sintéticas que se utiliza en ósmosis inversa, pero se la considera como una alternativa para el tratamiento de aguas contaminadas debido a su facilidad de adquisición y al precio económico que representa.

– Las variables que tienen mayor influencia en el proceso son: la diferencia de presión que se aplica a la alimentación que circula a través de la membrana, el caudal de agua a tratar, el tiempo de operación y las condiciones de la alimentación, que afectan a la cantidad y la pureza del agua producida. De dichas variables dependen la capacidad de producción del equipo y la selectividad de la membrana, operando en condiciones determinadas.

– Con las condiciones establecidas para la membrana y el equipo de ósmosis inversa diseñado, se ha logrado producir aproximadamente un litro de agua por hora de operación (0,926 l/h), dato que proporciona un resultado satisfactorio de acuerdo con los requerimientos de producción en equipos de ósmosis

inversa a pequeña escala (de cuatro a treinta litros por día). Tomando en cuenta el tiempo de vida útil de la membrana, el equipo produce alrededor de ocho litros al día.

– Se logra aminorar en cantidad considerable los contaminantes presentes en el agua residual motivo de estudio, reduciéndose principalmente el hierro, el manganeso y el zinc. La conductividad disminuyó de 6,637 mS a 3,368 mS, la turbidez de 36 NTU (unidades nefelométricas de turbidez) a 18 NTU y el pH se elevó de 6,45 a 6,91. El agua, producto de la ósmosis inversa en este caso, se encuentra dentro de los límites permisibles para aguas de clase "A" (destinadas al abastecimiento público) después de su sedimentación, filtración y desinfección, para el regadío de vegetales y la natación, excepto por el manganeso y el plomo. Por otra parte, se observa que la conductividad del agua excede los límites permisibles, esto significa que todavía contiene sólidos disueltos y algunos contaminantes iónicos, por lo que este tipo de agua tratada (agua con excesiva cantidad de iones metálicos) no es apta para el consumo humano, pero puede utilizarse para la preservación de la flora, fauna y como bebedero de animales, características de aguas de clase "B".

Segunda parte

Propuesta de intervención

Ventajas y perspectivas de esta propuesta

1. Introducción

Esta propuesta está orientada a procurar que una actividad minera pueda reutilizar el agua contaminada y producir alimento para animales como cuyes o vacas, que viven en los alrededores del ingenio de Machacamarca. Para ese fin, se ha explicado en la primera parte de este libro cómo se puede implantar nuevas tecnologías para el tratamiento de aguas ácidas y producir cultivos en ambientes controlados con aguas tratadas del ingenio de Machacamarca. Esa producción estará destinada a la obtención de alimento (forraje) para el ganado de la zona. La innovación tecnológica permitirá la producción de forraje durante todo el año para combatir las inclemencias del tiempo y la contaminación minera existente en el sector.

2. Objetivos

Tiene, pues, como objetivo general producir cultivos hidropónico (forrajes) en ambientes controlados con aguas tratadas del ingenio de Machacamarca.

Los objetivos específicos son: construir un invernadero para la producción de cultivos hidropónicos (forraje), diseñar el sistema de riego para el invernadero, construir una planta de tratamiento de aguas ácidas en el ingenio de Machacamarca. Se espera obtener una tecnología nueva para el tratamiento de aguas ácidas provenientes del ingenio de Machacamarca que serán utilizadas en la producción de cultivos forrajeros en ambientes controlados con un sistema de riego automatizado.

Por consiguiente, en esta segunda parte se detalla los tiempos de esta intervención, las personas que involucrará, los costos que tiene y los beneficios que se espera alcanzar.

Los resultados esperados de la propuesta son los siguientes:

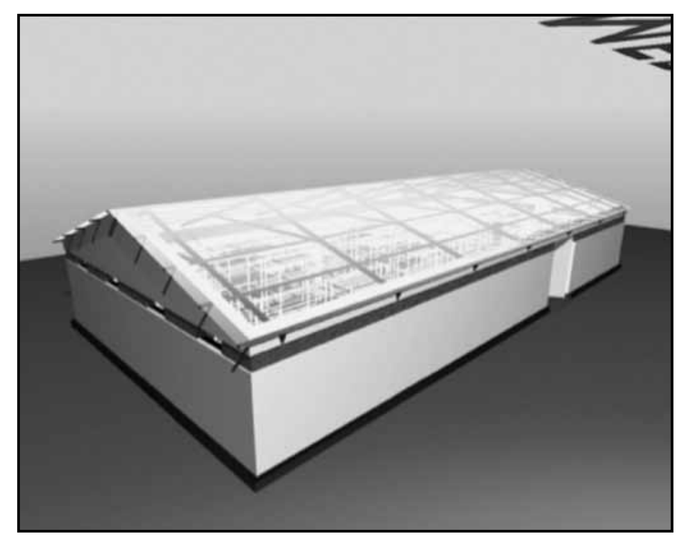
- Recuperar las aguas ácidas del ingenio de Machacamarca.
- Reutilizar esas aguas tratadas en la producción de cultivos forrajeros.
- Implantar la tecnología de la producción de cultivos forrajeros en ambientes controlados mediante la hidroponía.
- Usar adecuadamente el agua tratada mediante un sistema de riego tecnificado.
- Producir cultivos forrajeros todo el año para el consumo del ganado.
- El siguiente cuadro expresa la metodología de la propuesta.

Cuadro 52
Metodología

Estrategia	Realizar el tratamiento de aguas ácidas
Actividades	
1	Construcción de fosas generadoras de compost
2	Diseño de las fosas de tratamiento de aguas ácidas
3	Construcción de fosas de tratamiento de aguas ácidas
Estrategia	**Alternativas de producción agrícola sin tomar en cuenta el uso de suelo**
Actividades	
1	Construcción de un invernadero
2	Diseño y construcción de platabandas para la producción de cultivos hidropónicos
3	Implantación de un sistema de riego tecnificado (uso de aguas tratadas)
Estrategia	**Producción de alimento (forraje) para el ganado todo el año**
Actividades	
1	Utilizar aguas ácidas tratadas para el suministro todo el año
2	Cultivar especies forrajeras mediante la técnica de la hidroponía

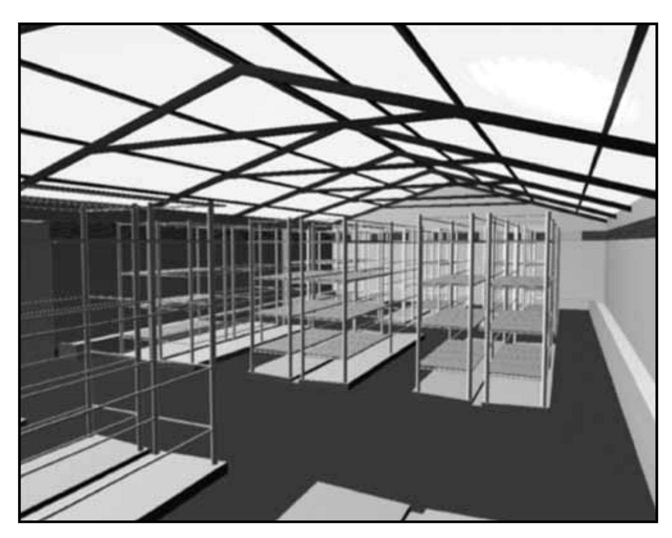
Fuente: Thuska Uma 2009

Imagen 4
Vista externa de un invernadero tipo para cultivos hidropónicos



Fuente: Thuska Uma 2009

Imagen 5
Vista de un invernadero tipo para cultivos hidropónicos (con platabandas)

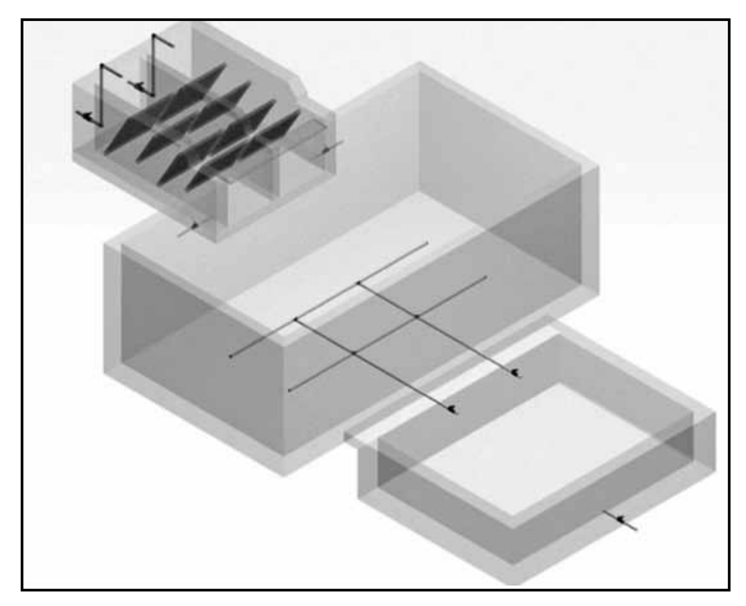


Fuente: Thuska Uma 2009

3. Localización

La intervención será ejecutada en el ingenio de Machacamarca, del municipio del mismo nombre, segunda sección municipal de la provincia Pantaleón Dalence, en el departamento de Oruro.

Imagen 6
Vista panorámica del sistema de tratamiento de aguas del ingenio de Machacamarca



Fuente: Thuska Uma 2009

4. Beneficiarios

Los beneficiarios directos de la propuesta son los trabajadores del ingenio Machacamarca, quienes podrán criar cuyes en la misma planta y alimentarlos con forraje obtenido en los invernaderos para consumir los cuyes cuando crezcan. Los beneficiarios indirectos serán los pobladores del área de influencia, quienes pueden adoptar la tecnología aplicada en el ingenio. También se beneficiarán la minería pequeña y los cooperativistas, que pueden copiar esta tecnología. En suma, los beneficiarios serían todos los pobladores, puesto que también se estaría controlando la emisión de efluentes.

La determinación exacta de la población beneficiaria dependerá de la participación activa de la población afectada por la contaminación. Para ello se considera:

- Familias que habitan en el centro poblado del ingenio de Machacamarca
- Familias que se encuentran alrededor del río Machacamarca.
- Familias que cuentan con cultivos que se encuentran expuestos a la contaminación
- Familias expuestas a riesgos de salud
- Familias que no cuentan con un sistema de distribución de agua potable domiciliaria (pileta pública)
- Otra población que consideren los actores y agentes locales

5. Viabilidad de la propuesta

Tiene cuatro aspectos clave:

El aspecto técnico incluye conocimiento adecuado del tratamiento de aguas ácidas (con las investigaciones realizadas), es decir los resultados de la investigación realizada sobre la recuperación del agua contaminada con la implementación de una planta piloto para el tratamiento de aguas con compost y la realización del experimento sobre la viabilidad de la implementación de cultivos hidropónicos, en especial para el cultivo de cebada forrajera y lechugas regadas con aguas tratadas con compost. También cuenta la experiencia en producción de cultivos hidropónicos.

Las pruebas con los tres tipos de sustrato (estiércol de llama, estiércol de ovino y residuos de cocina) efectuadas en laboratorio a las 24 horas, 48 horas y 72 horas dieron como resultado la efectividad del tratamiento. Ahí, en orden de eficiencia, el más recomendable es el compost de residuos de cocina, luego el estiércol de llama, y finalmente el compost de ovino, según los parámetros de pH, CE y presencia de cadmio, fierro y zinc que cada uno logró mejorar, como se puede observar en el cuadro siguiente, que se refiere a la

transformación lograda por los tres tipos de compost en el pH de las aguas ácidas :

Cuadro 53
Logros del uso de compost expresados en valores de pH en agua a las 24, 48 y 72 horas

Horas	Inicial	24 hrs	48 hrs	72 hrs
Compost de llama	3,4	7,4	7,4	7,0
Compost de restos de cocina	3,4	7,3	7,6	7,4
Compost de ovino	3,4	7,3	7,4	7,0

Fuente: Thuska Uma 2009

Tras la implantación de la planta piloto en el ingenio de Machacamarca, el comportamiento del pH, la CE, el cadmio, fierro, zinc, sulfatos y sulfuros es el esperado: se ha reducido significativamente la presencia de cada uno de los elementos, con excepción del nitrógeno y los sulfatos, que en todo caso son elementos esenciales para los cultivos.

6. Mecanismos, equipo técnico y resultados

Los mecanismos y el equipo técnico adecuado para realizar el proyecto pasan por el aspecto económico, donde el apoyo que presta el Programa de Investigación Estratégica en Bolivia (PIEB) es fundamental. Como resultado de la implementación de este proyecto se podrá realizar el control de los efluentes hacia los cuerpos de agua sin tratamiento, y aprovecharlos para producir forraje.

Entre los recursos sociales necesarios para llevar adelante este proyecto está el apoyo institucional de la Corporación Minera de Bolivia (que es la que administra el ingenio de Machacamarca).

La implementación del proyecto es, pues, socialmente viable, ya que según los resultados de la investigación, la falta de tratamiento del agua contaminada puede afectar en los siguientes aspectos a los pobladores: salud, emigración y relaciones institucionales.

También es ambientalmente viable porque ayudará a reducir la generación de aguas ácidas, permitirá producir desechos vegetales para el compost y aumentará la producción de ganado.

El invernadero, en especial, se constituye en un sistema de producción ecológica; por tanto, es muy reducido el grado de contaminación ambiental que pueda producir.

7. Aplicabilidad de la propuesta

La aplicación se dará mediante la administración del ingenio y con el apoyo del personal técnico asignado para este fin.

En la fase de ejecución de cualquier iniciativa o proyecto existe un elemento importante que es la planificación. En este sentido, la planificación se realizará de forma participativa con los beneficiarios. Esta planificación participativa consiste en la discusión de los aspectos que conlleva la puesta en marcha del proyecto, sus implicaciones, su alcance e impacto que generará una vez implementado.

Se ha diseñado mecanismos de transferencia con tres principios básicos: 1. *equidad*: los beneficiarios deben asumir progresivamente una mayor cantidad de competencias en condiciones de equidad; 2. *eficiencia*, donde es necesario proveer y promover incentivos para que haya generación de ingresos como producto del uso de los recursos provenientes del invernadero y del sistema de riego; de no hacerlo, se fomentaría un menor esfuerzo productivo y un uso ineficiente de la infraestructura y sus componentes; 3. *transparencia*: el mecanismo de transferencia del proyecto debe ser lo más transparente y sencillo posible, pues permitirá evitar la injerencia de grupos ajenos o algún tipo de corrupción en el funcionamiento del proyecto; la transparencia fomentará además mayor credibilidad en el sistema de asignación de recursos y de funciones, favorecerá la rendición de cuentas hacia la población y los usuarios e introducirá una mayor predictibilidad en los montos correspondientes al funcionamiento del proyecto.

Adicionalmente, el diseño de los mecanismos de transferencia requiere examinar los siguientes elementos: a) la distribución de

funciones específicas entre las diferentes instancias que participan en el proyecto (nivel central de gobierno, intermedio y local o proveedor de insumos); b) en la medida que las distintas categorías de gasto reflejen distintos objetivos en el proyecto, se puede optar por la creación de mecanismos de transferencia distintos para esas categorías, enfocados a objetivos específicos; c) las alternativas de criterios relevantes para la asignación de los recursos al proyecto; d) los mecanismos utilizados para realizar la transferencia (convenios de gestión, transferencias contra proyectos, fondos con fines predeterminados, etc.).

8. Empoderamiento social

Con frecuencia, el concepto de empoderamiento se utiliza cuando se hace referencia a la mujer. Los programas de empoderamiento se orientan frecuentemente a permitir el acceso de las mujeres a los recursos y a la toma de decisiones, tanto individuales como colectivas y conseguir que ellas se perciban a sí mismas capaces y legítimas para ocupar un espacio en la toma de decisiones. El empoderamiento se incentiva cuando se fomentan la autoconfianza, seguridad en sí misma y asertividad; el poder para tener autoridad para tomar decisiones, realizar cambios y resolver problemas, y la capacidad de organizarse con otras personas para alcanzar una meta común. Sin embargo, hoy en día el empoderamiento se ha convertido en el paradigma de las teorías del desarrollo. Este concepto ha permitido que los individuos y sociedades que hasta ahora estaban marginados de la toma de decisiones sean ahora el eje central de las intervenciones.

Así, el desarrollo comunitario empieza con sus raíces en el individuo (capital social), al interior de la persona. Cada ser humano es un sujeto con una vida interior, un sistema de creencias y actitudes, algunas de las cuales interiorizan condiciones externas de pobreza. El desarrollo comunitario debe empezar con el interior de la persona. Ello no implica trabajar sobre el individuo sino con el individuo, apelando a los valores más altos de las personas y al sentido (latente) de auto-valoración.

Sólo el individuo puede trabajar en su propio interior; pero el facilitador puede proveer el ambiente y un “shock” a la consciencia

(Nicoll, 1980) para iniciar un proceso de empoderamiento. Por lo tanto, la organización facilitadora acompaña por un período y en definitiva es la comunidad / región quien se queda con el aprendizaje.

La participación comunitaria y familiar en la presente propuesta facilitará el empoderamiento individual y de la población objetivo. Las familias no solo tendrán la destreza de comunicarse efectivamente, sino la capacidad y disposición de actuar buscando la sostenibilidad y la innovación a partir de la experiencia establecida en la región. Ellos podrán desmantelar los obstáculos interiores para alcanzar la visión tales como el temor y la ausencia del trabajo colaborativo. Por otro lado, estarán en condiciones de plantear objetivos manejables animándose a si mismos y a los demás con retro alimentaciones positivas, corrigiendo la ruta de uno continuamente, y manteniendo la flexibilidad y compromiso.

De esta forma, que se trabajará en el Ingenio Machacamarca, se construirá una base sólida para el desarrollo de la comunidad en base al empoderamiento comunitario y familiar. El deseo de trabajar más allá de los límites de la comunidad emergerá conforme el sentido de conexión se expanda y el sentido de la sostenibilidad se irá consolidando precisamente gracias a este componente. La población tendrá la capacidad de mostrar su experiencia para posibles réplicas en otras regiones y también la capacidad de coordinar con instituciones públicas y privadas en la experiencia y otras que puedan ser implementadas.

9. Procesos de seguimiento y monitoreo

Para el éxito en la aplicación de esta propuesta se requerirá una acción efectiva de coordinación entre las autoridades del ingenio, la Empresa Minera Huanuni, COMIBOL y los trabajadores. Con ellos se realizará los esfuerzos de capacitación y sensibilización para la formación del equipo y la población, acompañados de asistencia técnica, monitoreo de las capacitaciones y funcionamiento del proyecto. La propuesta de intervención desarrollará mecanismos de monitoreo y evaluación tomando en cuenta que la planificación es un proceso en el cual se verifica continuamente la acción, la evaluación y la corrección de los proyectos o intervenciones; por tanto no se puede prescindir de

la estrecha relación que existe entre decidir, poner en marcha y evaluar. Entendida la evaluación como parte de este proceso de planificación-ejecución, ésta cumple con la importante facultad de constituirse en mecanismo de retroalimentación de información básica para la reconstrucción y mejoramiento de la intervención social.

Por otro lado, la evaluación del proyecto no se reducirá simplemente a un análisis comparativo entre los objetivos y metas programados y lo que efectivamente se cumpla. Tampoco se limitará a un análisis de la eficiencia de las acciones mediante una relación entre los insumos financieros y materiales y los objetivos cumplidos. Si bien son importantes los análisis costo-beneficio del proyecto, la presente propuesta considera que es importante estructurar la evaluación de modo que permita tener una dimensión cuantitativa de la intervención social y económica, sin dejar de lado la dimensión cualitativa.

Por tanto, la evaluación del proyecto tomará en cuenta los objetivos planteados y la planificación comunitaria (satisfacción del servicio que presta el proyecto) contrastándolos con el mejoramiento de las condiciones de vida de la población, y se vinculará con la información de los proyectos existentes en el ingenio.

Es fundamental revalorizar las variables y categorías cuantitativas y cualitativas en el análisis, la innovación de las formas de participación de las familias y la comunidad en el proyecto, además de los actores involucrados, y sobre todo desarrollar procesos que permitan medir los efectos y las variaciones que la intervención producirá en la población objetivo y en su contexto.

El proceso de seguimiento y evaluación de la intervención propuesta se fundamenta en la orientación de la evaluación como un proceso permanente, mediante el cual se realiza seguimiento al cumplimiento de actividades y los procedimientos previstos; y por otro lado, como el momento en que se verifica si se está logrando o no los productos y los impactos esperados en términos de la equidad, la eficiencia y la transparencia anteriormente mencionadas.

A estos criterios y mecanismos de monitoreo y evaluación se añade: a) una evaluación orientada hacia los objetivos, pues funda-

mentalmente nos permite medir el cumplimiento de metas y objetivos propuestos; b) una evaluación para la utilización de resultados, que nos permite utilizar y potencializar la información y resultados del proyecto con miras a mejorar las intervenciones futuras; c) una evaluación centrada en los beneficiarios, que nos permite mostrar la trama de actores involucrados así como recabar información sobre el funcionamiento y eficiencia de las instancias y espacios de capacitación (aquí es necesario señalar que, para un efectivo monitoreo y evaluación, se dotará a las familias beneficiarias de una metodología que les permita hacer el seguimiento a los compromisos asumidos y la evaluación respectiva desde el punto de vista de la población; d) una evaluación de impacto, que nos permitirá mirar en el tiempo hasta qué punto se logró o modificó el problema en cuestión que orienta la realización de la intervención; la evaluación se realizará después de dos años de haber implementado la propuesta.

10. Sostenibilidad de la propuesta

En el cuadro siguiente se explica cómo se dará sostenibilidad a la aplicación de la propuesta. Para empezar, hay tres factores muy importantes que se debe tomar en cuenta: factor institucional, factor técnico y factor económico.

Cuadro 54
Plan de sostenibilidad del proyecto

Institucional: ¿Quiénes se responsabilizarán por el funcionamiento diario del sistema? (considerar voluntarios y funcionarios pagados y qué porcentaje de tiempo).	Se conformará un comité de productores; ellos designarán un responsable por semana.
¿Quiénes se responsabilizarán por la vigilancia y monitoreo del funcionamiento del sistema?	El comité de productores y el equipo técnico del proyecto.
Técnico: ¿Existen técnicos capacitados para mantenimiento de los equipos en la zona? ¿Quién apoyará a resolver problemas técnicos?	Se capacitará a productores en el manejo y mantenimiento del equipo. Se realizará el seguimiento por un técnico del proyecto (visitas y seguimiento).
Económico: ¿Cuáles serán los costos de operación del proyecto? Salarios. Electricidad, agua, etc. Reparación de equipo, etc. Otros.	El salario del personal encargado del manejo y producción, costo de mantenimiento, compra de insumos y materiales se sostendrá con aportes de los beneficiarios. El aporte se realizará en relación con el consumo de forraje de cada productor, tomando en cuenta la demanda de alimento para su ganado.

(Continúa en la página siguiente)

(Viene de la página anterior)

¿Cuáles serán los costos de mantenimiento y remplazo de equipos? (consideraciones vida útil del equipo).	Se considerará de acuerdo con la producción que se obtenga y las ganancias que se perciba será un 10% de los ingresos.
Estimación de cobros o aportes.	De acuerdo al consumo de forraje, tomando en cuenta que el forraje se venderá a un precio 50% menor al del mercado.
¿Se cobrará tarifa a beneficiarios del proyecto? ¿Cuánto?	Se cobrará una tarifa fija por productor, para gastos imprevistos.
Cuantificar ingresos anuales de producción.	En este parámetro se tomará en cuenta la cantidad de producción diaria, mensual y anual para dar lugar al ingreso económico anual (para no especular, el proyecto aún no ha considerado cifras) .

Fuente: Thuska Uma 2009

11. Análisis económico

Para el análisis económico es importante tomar en cuenta la superficie del invernadero, que tiene un diámetro de 15,80 por 7,80 metros, y un altura de 3,20 metros. Tiene estructuras para cuatro pisos de bandejas, donde se producirá los forrajes.

Además incorpora un sistema de riego automático para la producción de los cultivos, que están diseñados de acuerdo a requerimientos técnicos y la disposición de las bandejas.

El elemento esencial para la producción en cultivos hidropónicos es el agua, que será tratada en dos etapas, una en las lamelas y otra en las pozas de tratamiento, las que finalemente serán descargadas en un depósito. Las pozas de tratamiento son tres: una, que es la lamela, mide 1,95 por 3,22 metros, mientras que las medidas de la poza de tratamiento son de 7,41 por 4,50 metros y el depósito de agua tratada tiene 3,75 por 4,50 metros de largo.

Se tratará aproximadamente veinte metros cúbicos de agua por día, proveniente del ingenio de Machacamarca, destinadas a abastecer la producción de forraje hidropónico.

Los costos de producción del sistema de tratamiento se muestran en el siguiente cuadro:

Cuadro 55
Costos de producción para el tratamiento de aguas en el ingenio Machacamarca

Nº	Concepto	Monto (Bolivianos)
1	Costo del invernadero	130.346,90
2	Costo de la planta de tratamiento	41.544,85
3	Sistema de riego en hidroponía	20.075,00
4	Elaboración de compost	18.905,40
5	Producción de cebada	23.220,00
	Total	234.092,15

La producción en el primer año alcanzaría a 21.600 kilogramos de forraje verde hidropónico, lo que variaría en el segundo año alcanzando la producción de forraje a 43.200 kilogramos por año. Con estos indicadores se ha realizado un cálculo para diez años, con los siguientes indicadores financieros:

VAN: 5.815 Bs.
TIR: 11%
RBC: 1,254

Se puede advertir que los indicadores son positivos, por lo que el proyecto es viable desde el punto de vista económico, y más aun desde el punto de vista ambiental y social.

La alternativa está planteada; la tecnología puede ser adoptada por la minería pequeña y cooperativizada, esencialmente. Es necesario emprender trabajos que puedan mitigar la contaminación ambiental empleando para ello materiales locales y de bajo costo, y que a la vez sean disponibles.

La decisión está en manos de COMIBOL, de la Empresa Minera Huanuni y el ingenio de Machacamarca para que se pueda emprender trabajos de remediación ambiental y se cuide la Madre Tierra.

Para terminar, queremos destacar el apoyo del Programa de Investigación Estratégica en Bolivia (PIEB) para el desarrollo de este trabajo, que de alguna manera contribuye a mejorar la gestión ambiental. La coordinación con sus técnicos ha sido permanente y sin medida de tiempo.

Bibliografía

Ackman, B.
2000 "Feasibility Of Lime Treatment At The Leviathan Mine Using The In-Line System", en *Mine Water And The Environment*, Nº 19, pp. 56-75.

Alcolea, A. *et al.*
2001 *Barrera geoquímica* (boletín geológico y minero), pp. 229-255.

Alzérreca, H.
1992 *Características y distribución de los bofedales en el ámbito boliviano*, s.l.

Amos, P. W y P. L. Younger
2010 "Substrate Characterisation For A Subsurface Reactive Barrier To Treat Colliery Spoil Leachate", en *Water Research* (en prensa).

Asociación Integral de Camélidos de los Andes Altos (AIGACAA)
Autoridad Binacional del Lago Titicaca (ALT)
S.a *Gerencia del proyecto de biodiversidad*, La Paz, 177 p.

Auza, M.
1999 *Estimación de tasas de erosión en la cuenca del valle alto mediante la ecuación universal de pérdida del suelo y SIG* (tesis de maestría profesional: "Levantamiento de recursos hídricos"), Cochabamba, CLAS/ITC/UMSS.

Bannister, A. F.
1997 "Lagoon And Reed-Bed Treatment Of Colliery Shale Tip Water At Dodworth, South Yorkshire", en Younger, P. L. (editor): *Minewater Treatment Using Wetlands* (Proceedings Of A National Conference Held 5th September 1997), Londres, Universidad de Newcastle, Chartered Institution of Water and Environmental Management, pp.105-122.

Barrientos, E.
2004 *Manejo de praderas y producción de forrajes*, Oruro, Facultad de Ciencias Agrícolas y Pecuarias, Universidad Técnica de Oruro, 161 pp.

Braun Blanquet, J.
1979 *Fitosociología*, Madrid, H. Blume Ediciones.

Beck, S.
1988 "Las regiones ecológicas y las unidades fitogeográficas de Bolivia", en *Manual de ecología*, La Paz, C.B. de Morales (Ed.), pp. 233-271.

Belkacem, M., S. Bekhti y K. Bensadok
2006 *Groundwater Treatmente By Reverse Osmosis*.

Benner, S. G., D. W. Blowes y C. J. Ptaceck
1997 "A Full-Scale Porous Reactive Wall For Prevention Of Acid Mine Drainage", en *Ground Water Monitoring and Restoration*, 17, N° 4, pp. 99-107.

Broman, P. G y T. Goransson
1999 "The Swedish Acid Mine Drainage Experience: Research Development And Practice", en Azcue, J. M. (editor): *Environmental Impacts Of Mining Activities. Emphasis On Mitigation And Remedial Measures*, Springer, Heidelberg, pp. 203-228.

Bódalo Santoyo, A. y J. L. Gómez Carrasco
2003. *Applicaction Of Reverse Osmosis To Reduce Pollutants Presents In Industrial Wastewater.*

CACC
2002 *Monitoreo de suelos en el departamento de Oruro* (informe final de consultoría), Oruro, Prefectura del Departamento.

CITES
1996 *Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestre.*

Chicago Enviromental and Conservation Programs
Field Museum of Natural History and Conservation Biology
S.a. *Conservation International.*

Cohen, R. y W. Staub
1992 *Technical Manual For The Design And Operation Of A Passive Mine Drainage Treatment System (Report To The US Bureau Of Land Reclamation)*, Golden, Colorado, Colorado School of Mines, 69 pp.

DIPC-UTO
2008 *Diagnóstico de recursos naturales y renovables de flora y fauna*, Oruro, UTO- Prefectura de Oruro.

Dirección Departamental de
Recursos Naturales y Medio Ambiente
2005 *Flora y fauna silvestre*, Oruro, Prefectura de Oruro.

Eva, H. D. *et al.*
2002 *A Vegetation Map Of South America (Final Report)*, Luxemburgo, Office for Official Publications of the European Communities, Join Research Centre.

Ellemberg, H.
1981 *Desarrollar sin destruir. Respuestas de un ecólogo a quince preguntas de agrónomos y planificadores bolivianos*, La Paz, Instituto de Ecología.

FDTA, Fundación Altiplano y PCI
2004 *Producción de semilla de haba certificada para exportar al exterior e interior del país*.

Fjeldsa, Kessler
1999 "Status Of Birds Of Steppe Habitat Of The Andean Zone An Patagonia", en *Technical Publication*, Nº 7, pp. 81-95.

2004 *Vegetación de Bolivia*, La Paz.

Flores
1996 *Estudio de comunidades vegetales en la provincia Cercado del deparatamento de Oruro*, Oruro, Universidad Técnica de Oruro.

Foster, B. R. y E. Hernández
1995 *Un método de transectos variables para la evaluación rápida de comunidades de plantas en los trópicos* (manuscrito no publicado).

Foster, G. y W. Wishmeier
1974 "Evaluating Irregular Slopes For Soil Loss Prediction", en *Transactions of the ASAE*, vol. 17, Nº 2.

Foust, Alan S.
1993 *Principios de operaciones unitarias*, s.l., (segunda edición).

Fox, Robert W. y Alan T. McDonald
1990 *Introducción a la mecánica de fluidos*, s.l., (segunda edición).

Frandson, R. D. y Spurgeon
1996 *Anatomía y fisiología de los animales domésticos*, s.l., Mc Graw Hill Interamericana (quinta edición).

Geankoplis, Christie J.
1998 *Procesos de transporte y operaciones unitarias*, México, University of Minnesota (tercera edición).

Geucke, T. *et al***.**
2005 *Performance Of A Small Scale Ro Desalinator.*

Hamilton, Q. *et al.*
1999 "Passive Treatment Systems For The Remediation Of Acid Mine Drainage At Wheal Jane", en *Journal Of The Chartered Institution*

Of Water And Environmental Management, Cornwall, Nº 13, pp. 93-103.

Heal, K. V. y C. Salt
1999 "Treatment Of Acidic Metal-Rich Drainage From Reclaimed Ironstone Mine Spoil", en *Water Science & Technology*, Nº 39, pp. 141-148.

Hedin, R., W. Nairn y R. Kleinmann
1994 "Passive Treatment Of Polluted Coal Mine Drainage" (Bureau of Mines Information Circular 9389), United States Department of Interior, Washington DC, 35 pp.

Ibisch *et al.*
2002 *Estudio de comunidades vegetales. Flora silvestre*, s.l.

Instituto Geográfico Militar
1997 *Cartas topográficas. Departamento de Oruro, escala 1:250.000*, La Paz, Instituto Geográfico Militar - República de Bolivia.

Instituto Nacional de Estadísticas
2002 *Censo Nacional de Población y Vivienda 2001: Oruro, resultados departamentales*, Serie II, Volumen 4, La Paz, INE - República de Bolivia.

Kemmer, F. N. y J. Mc Callion
1993 *Manual del agua*, s.l, Mc Graw Hill.

Kern, D. Q.
1999 *Procesos de transferencia de calor*, México, Editorial Mc Graw Hill (31ª reimpresión).

Linsley, R., M. A. Kohler y J. Paulhus
1975 *Hidrología para ingenieros. Distribución tipo Gumbel I*, (segunda edición), México, Mc Graw Hill.

Lyonnaise des Eaux
1998 *Tratamiento del agua por procesos de membrana. Principios, procesos y aplicaciones*, s.l., American Water Works Association, Research Foundation, Editorial Mc Graw Hill, año 1998.

Mannaerts, C.
1999 *Factores de erosión. Módulo 11: degradación de suelos*. (ITC, Curso de Postgrado en Levantamiento de Recursos Hídricos, notas de clase y ejercicios), Cochabamba, CLAS.

Metfcald, H.
1981 *Tratamiento y depuración de las aguas residuales*, Barcelona, Editorial Labor (segunda edición).

Ministerio de Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente
1996 *Proyecto Piloto Oruro, 1996: impacto de la minería y el procesamiento de minerales en recursos del agua y lagos*, Oruro, Secretaría Nacional de Minería, Swedish Geological AB, 120 pp.

Montaño Nemer, J. C.
2002 *Química general*, (primera edición), tomo II, s.l.

Montoya, J. C. y M. Pérez L.
2009 *Evaluación de la calidad del agua, sedimentos y totora en el lago Uru Uru,* Oruro, Editorial Latinas.

Moore, I. D. y J. Gallart
1991 *Overview Of The Hydrologic And Water Quality Modeling*, Australia, Center for Resourse and Environmental Studies, Australian National University.

Mostacedo, B. y T. S. Fredericksen
2000 *Manual de métodos básicos de muestreo y análisis en ecología vegetal*, Santa Cruz, 52 pp.

Mott, R. L.
1993 *Mecánica de fluido aplicada*, s.l., (4ª edición).

Municipio de Machacamarca
2001 *Plan de Desarrollo Municipal 2001-2005*, Machacamarca.

Navarro y Maldonado
2002 *Geografía ecológica de Bolivia: vegetación y ambientes acuáticos*, Cochabamba, Centro Editorial Simón I. Patiño, Departamento de Difusión.

Navarro, G.
1997 *Clasificación biogeográfica y bioclimática de Bolivia*, La Paz.

Organización Mundial de la Salud
1971 *International Standars For Drinking Water*, Ginebra, OMS, (tercera edición).

Plan de Acción Ambiental del Departamento de Oruro
2005 *Las acciones ambientales en el departamento de Oruro. Flora y fauna*, Oruro, Dirección Departamental de Recursos Naturales y Medio Ambiente, 112 pp.

Rafaelli, S.
2003 *Paisajes erosivos en cuencas de montaña* (tesis doctoral en ciencias de la ingeniería), Córdoba, Universidad Nacional de Córdoba.

Reig, O.A,
1980 *A New Fósil Genus Of South America Cricetid Rodens Allied To Wiedomys, With Assessment Of The Sigmodontinae*, J. Zool, Londres, Nº 192, pp. 257-281.

1987 *An Assessment Of The Systematics And Evolution Of The Akodontini, With Description Of The New Fossil Species Of Akodontini, With Descrption Of The New Fossil Spcies Of Akodon (Cricetidae: Sigmodontinae)*, Fieldiana Zool, 347-399 pp.

República de Bolivia
1992 *Ley Nº 1333: Ley del Medio Ambiente*, La Paz, Gaceta Oficial de Bolivia.

1996 *Decreto Supremo Nº 24176: Reglamento de la Ley del Medio Ambiente*, La Paz, Gaceta Oficial de Bolivia.

1996 *Estudio preliminar de degradación de suelos en Bolivia*, La Paz, Superintendencia Agraria.

Rubín de Celis, P.
2001 *Capitalización en Bolivia, la estafa del siglo.* La Paz. Fondo Editorial de Diputados.

Servicio Nacional de Hidrología y Meteorología
1996 *Series históricas meteorológicas para el departamento de Oruro*, Oruro.

Sisson, Septimus y James Daniels Grossman
1982 *Anatomía de los animales domésticos*, Barcelona, Salvat Editores (5ª edición), tomo I.

Sette Ramalho, Rubens
1996 *Tratamiento de aguas residuales*, Editorial Reverte, España.

Soria Pinaya, N. B.
2001 "Estudio exploratorio de alternativas de mitigación de la contaminación de aguas ocasionada por las cooperativas mineras de Huanuni, Oruro" (proyecto de grado), Oruro, UTO.

Taylor, J. S. y M. Wiesner
2002 *Calidad y tratamiento del agua. Manual de suministros de agua comunitaria*, s.l., American Water Works Association, Mc Graw Hill (5ª edición).

Taucer, E.
1993 "Biología. Trasplante y desarrollo de cuatro helofitos en la zona andina de La Paz, su uso en sistemas de purificación de aguas" (tesis para optar el título de licenciado en biología), La Paz, UMSA.

Transredes
2001 *Auditoría ambiental del derrame de hidrocarburos en el río Desaguadero*, vol. 1, 2, 3 y 6, Oruro- Bolivia.

Vallejos, P.
2004 "Pérdida de suelos por erosión hídrica en el departamento de Oruro a través de modelos espaciales" (tesis de maestría profesional "Levantamiento de recursos hídricos"), Cochabamba, CLAS/ITC/UMSS.

Villafafil, A. e I. M. Mujtabab
2002 *Fresh Water By Reverse Osmosis Based Desalination*, s.l., septiembre.

Weber, Walter J.
1979 *Control de calidad del agua. Procesos físico-químicos*, Barcelona, Editorial Reverte.

Wischmeier, W. H. y D. D. Smith
1978 "Predicting Rainfall Erosion Losses. A Guide To Conservation Planning", en *USDA Handbook*, Nº 537.

Younger, P. L.
1997 "The Longevity Of Mine Water Pollution: A Basis For Decision-Making", en *Science Of The Total Environment*, 194/195, pp. 457-466.

1998 "Design, Construction And Initial Operation Of Full-Scale Compost-Based Passive Systems For Treatment *Of* Coal Mine Drainage And Spoil Leachate In The UK", en *Proceedings Of The International Mine Water Association Symposium On "Mine Water And Environmental Impacts"*, Johannesburg, Sudáfrica, 7 al 13 de septiembre de 1998, (Volumen II), pp. 413-424.

2002 "A Reducing And Alkalinity-Producing System (Raps) For The Passive Treatment Of Acidic, Aluminium-Rich Leachates Emanating From Revegetated Colliery Spoil Materials At Bowden Close, County Durham", en *Proceedings Of The Claire Annual Project Conference*, 11 de abril de 2002, Imperial College, Londres, Cuaderno 7.

Younger, P. L., Banwart, S. y Hedin, R. S.
2002 *Mine Water: Hydrology, Pollution, Remediation*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 464 pp.

Younger, P. L. *et al.*
1997 "Effective Passive Treatment Of Aluminium-Rich, Acidic Colliery Spoil Drainage Using A Compost Wetland At Quaking Houses, County Durham", en *Journal Of The Chartered Institution Of Water And Environmental Management*, Nº 11, 200-220.

Zambrana, E.
1999 *Entomología agrícola andina*, Lima.

Zamorano, Tania
1996 "Estudio de alternativas de tratamiento de aguas residuales de la empresa metalúrgica Vinto" (proyecto de grado), Oruro, UTO.

Sitios *web* consultados

www.lenntech.com/espanol/que-es-osmosis-inversa.htm
www.textoscientificos.com/quimica/osmosis/inversa
www.hidritec.com/tec-osmosis.htmwww.im-university.com/osmosis-inversa.htm
www.aquapurificacion.com/detalles-osmosis-inversa.htm
www.es.wikipedia.org/wiki/Depuraci%C3%B3n_de_aguas
www.aguapura.ecodeter.com/osmosis.asp
www.luctra.com/manualOsmosis/Fundamentos.pdf
www.bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/16.html
www.lenntech.com/espanol/Tecnología-de-membrana.htm
www. labquimica.wordpress.com/2008/05/03/osmosis-inversa/
www.unitek.com.ar/productos-osmosis-inversa
www.upcommons.upc.edu/pfc/bitstream
www.astramatic.com/esp/Producto/OsmosisInversaInferior.html
www.prowaterargentina.com.ar/articulos/INFO_OSM_INV_06.pdf
www.living-water.org/osmosis_inversa
www.hidrosoluciones.com.ar/osmosis.php
www.aguamarket.com/Sql/temas_interes/osmosis-inversa.asp
www.gratisweb.com/aguapurificada2/osmosis2.htm

Otros documentos consultados:

Microsoft Encarta: 1993 - 2008, Microsoft Corporation, 2009.
Proyecto Altagro, en convenio con la Facultad de Ciencias Agrarias y Fundación Sedeba, Oruro.

Anexos

1. Abreviaciones y símbolos usados en este libro

ALD:	Drenaje anóxico en caliza (*anoxic limestone drainage,* en inglés)
C/N:	Relación adecuada de carbono y nitrógeno
c/t:	Con tratamiento
CE:	Conductividad eléctrica
cm:	Centímetros
Conc:	Concentración
CTS:	Contenido total de sales
CV:	Coeficiente de variación
Da:	Densidad aparente
DQO:	Demanda química de oxígeno
Dr:	Densidad real
dS/m:	Decisiemens por metro
d/t:	Después del tratamiento
ESP:	Porcentajes de sodio extraíble
g/l:	Gramos por litro
GPS:	Sistema de posicionamiento global (*Global Positioning System)*
gr/cc:	Gramos por centímetro cúbico
ha:	Hectárea
kg/Bs:	Kilogramo por boliviano
kg/cm^3:	Kilogramo por centímetro cúbico
kg/m x s:	Kilogramo por metro por segundo
l/seg.:	Litro por segundo
m^3:	Metro cúbico
meq/l:	Miliequivalentes por litro

mg/l:	Miligramos por litro
ml/s:	Mililitros por centímetro
mm Hg:	Milímetros de mercurio
mm:	Milímetros
mmhos/cm:	Milimhos por centímetro
MO:	Materia orgánica
mS:	Milisiems
MS:	Materia seca
msnm:	Metros sobre el nivel del mar
NDVI:	Índice de vegetación normalizado
NT:	Nitrógeno total
NTU:	Unidades nefolométricas de turbidez
pH:	Potencial de hidrógeno
ppm:	Partes por millón
Psh:	Porcentaje de suelo húmedo
PSI:	Porcentaje de sodio intercambiable
Pss:	Porcentaje de suelo seco
PSS:	Porcentaje de sodio soluble
PT:	Fósforo total
Qa:	Depósito aluvial
Qcf:	Depósito coluvio-fluvial
Qcf:	Depósitos coluvio-fluviales
Qfl:	Fluvio-lacustre
RAS:	Relación de absorción de sodio
s/t:	Sin tratamiento
SAS:	*System Analisis Service*
seg:	Segundos
SIG:	Sistema de Información Geográfica
TAC:	Testigo agua contaminada
TA:	Testigo agua
TDS:	Sólidos disueltos totales
tn:	Toneladas
ton. métricas/día:	Toneladas métricas por día
$V_{permeado}$:	Volumen permeado
D:	Diámetro de la membrana
Q:	Caudal de diseño
D_C:	Diámetro de la coraza
L_E:	Longitud efectiva
L:	Longitud total del tubo

P:	Caída de presión
%H:	Porcentaje de hidrógeno
T:	Temperatura
<:	Menor que
>:	Mayor que
≤:	Menor o igual que
≥:	Mayor o igual que
μS:	Microsiems
μS/cm:	Microsiems por centímetro

2. Nomenclatura química

Ag:	Plata
Al:	Aluminio
As:	Arsénico
Au:	Oro
B:	Boro
Ba:	Bario
Be:	Berilio
Bi:	Bismuto
Br:	Bromo
C:	Carbón
Ca:	Calcio
Cd:	Cadmio
Cl:	Cloro
Cl^-:	Cloruro
Cl_2Hg:	Cloruro de mercurio
Co:	Cobalto
CO_2:	Dióxido de carbono
CO_3:	Trióxido de carbono
Cr:	Cromo
Cu:	Cobre
F:	Flúor
Fe:	Hierro
Ga:	Galio
H:	Hidrógeno
HCO_3^-:	Bicarbonato
Hg:	Mercurio
Ir:	Iridio

K:	Potasio
$K_2Cr_2O_7$:	Dicromato de potasio
K_2O:	Óxido de potasio
K_2O:	Óxido de potasio
La:	Lantano
Li:	Litio
Mg:	Magnesio
MgO:	Óxido de magnesio
Mn:	Manganeso
N:	Nitrógeno
Na:	Sodio
Ni:	Níquel
O:	Oxígeno
Os:	Osmio
P:	Fósforo
P_2O_5:	Óxido fosfórico
Pb:	Plomo
Rb:	Rubidio
Re:	Renio
Ru:	Rutenio
S:	Azufre
S_2-:	Sulfuros
Sb:	Antimonio
Se:	Selenio
Si:	Silicio
Sn:	Estaño
SO:	Monóxido de azufre
SO_4:	Sulfatos
Te:	Telurio
Ti:	Titanio
Tl:	Talio
Zn:	Zinc
$(CH_3C00)_2Pb$:	Acetato de plomo

Autores

Juan Carlos Montoya Choque

Ingeniero agrónomo, magister en economía del medio ambiente y recursos naturales. Autor de los libros: *Modelo bioeconómico para uso sostenible de llamas* (1999), *Efectos ambientales y socioeconómicos por el derrame de petróleo en el río Desaguadero* (2002), *Gestión ambiental del departamento de Oruro* (2005), *Salinización y metales* (2006), *Estimación del consumo de quinua en la ciudad de Oruro* (2007), *Lago Uru Uru: evaluación de la calidad del agua, sedimentos y totora* (2009). Fue docente de la Universidad Nacional Siglo XX, director departamental de recursos naturales y medio ambiente de la Prefectura del Departamento de Oruro, director de posgrado e investigación científica de la Facultad de Ciencias Agrarias y Veterinarias (FCAV) de la Universidad Técnica de Oruro. Actualmente es docente investigador de la FCAV - UTO y conferencista en temas ambientales.

Jorge Bernabé Amusquívar Fernández

Ingeniero químico, magister en ciencias de la educación superior, diplomado en didáctica tecnológica y tecnologías de información y comunicación. Entre su producción intelectual se puede citar: "Modelo del núcleo decreciente en la producción de $CaCl_2$", "Caracterización del flujo de fluidos en un reactor de lecho fijo", "Determinación del tamaño óptimo de catalizador en la descomposición del peróxido de hidrógeno", "Manual guía de trabajos experimentales Laboratorio Cinética y diseño de reactores" y otros trabajos. Actualmente es jefe de laboratorio de cinética y diseño de reactores de la Facultad Nacional de Ingeniería de la Universidad Técnica de Oruro.

Gunnar David Guzmán Vega

Ingeniero agrónomo; tiene una maestría en desarrollo rural sostenible, mención ambiental, y un diplomado en herramientas para la investigación, un diplomado en servicios de desarrollo empresarial rural. Fue consultor en medio ambiente de FUNBOLAC, responsable de producción ecológica en CAADI, técnico de ecoproducción en desarrollo alternativo en San Calixto - Chapare, oficial mayor técnico del municipio de Huanuni. A la fecha, docente investigador en medio ambiente en la Facultad de Ciencias Agrarias y Veterinarias de la Universidad Técnica de Oruro.

David Wilfredo Quispe Tapia

Ingeniero agrónomo, diplomado en gestión ambiental. Fue técnico del INRA; consultor del Proyecto de Fortalecimiento de Actividades Económicas Campesinas (La Paz); investigador en residuos sólidos en el triángulo de ferias, Oruro; capacitador en medio ambiente en escuelas periurbanas, por Save the Children, docente del ITESCAA, docente de la Universidad Técnica de Oruro (Facultad de Ciencias Agrarias y Veterinarias - sede Orinoca), coordinador del Programa Trigo (UTO-CIMMYT).

Rosmery Blanco Fernández

Ingeniera agrónoma, con especialidad en sistemas de información geográfica aplicados a los recursos naturales, tiene un diplomado en educación superior. Fue docente de la Facultad de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y Veterinarias de la Universidad Técnica de Oruro, investigadora en flora y fauna del Plan de Manejo de la Cuenca San Juan de Sora Sora. Actualmente es consultora del INRA.

Norma Mollo Mollo

Licenciada en comunicación social. Compiladora del libro *Remediación ambiental minera*, de la revista Habitat Nº 79: "Preocupaciones socioambientales por la minería en Oruro", articulista en temas ambientales en el periódico La Patria, coordinadora del periódico rural "La Capital". Fue responsable del área de comunicación del CEPA,

coordinadora y conductora del programa “El observatorio ecológico” (en radio Pío XII). Actualmente es coordinadora departamental de la Liga de Defensa del Medio Ambiente (LIDEMA).